RICHARD P. FEYNMAN

# ȘASE LECȚII UȘOARE

Bazele fizicii explicate
de cel mai strălucit profesor

HUMANITAS

# ȘASE LECȚII UȘOARE

RICHARD P. FEYNMAN s-a născut la New York în 1918. De la vârsta de cincisprezece ani a început să descopere pe cont propriu matematica, construind de unul singur un aparat matematic prin care să rezolve problemele cu care se confrunta încă înainte de a ajunge la colegiu. A urmat cursurile Institutului Tehnologic din Massaschusetts, apoi ale Universității Princeton, unde obține în 1942 titlul de doctor. Lucrarea sa de doctorat, sub îndrumarea lui John Wheeler, dovedea o frapantă originalitate și independență în gândire, punând piatra de temelie la ceea ce avea să fie cunoscut mai târziu drept „metoda integralei de drum“ și „diagramele Feynman“. În timpul războiului a participat la Proiectul Manhattan și, în afară de calculele complicate pe care era pus să le facă, plictisindu-se în izolarea de la Los Alamos, se amuza să spargă seifurile care conțineau documente ultrasecrete. După război, a devenit profesor la Universitatea Cornell, apoi la Institutul Tehnologic din California (Caltech). Aici, începând din anii '50, activitatea sa de cercetare s-a concentrat asupra electrodinamicii cuantice (contribuție pentru care a și primit în 1965 Premiul Nobel), superfluidității heliului lichid și dezintegrării beta. Metoda diagramelor Feynman, o cale intuitivă, sugestivă și extrem de puternică de reprezentare a interacțiilor, a devenit poate unealta cea mai folosită în fizica teoretică. În afară de cercetare, Feynman a fost atras, ca puțini alți fizicieni, de lucrul cu studenții. Mărturia cea mai semnificativă sunt cursurile ținute la Caltech în anii 1961–1963, cursuri de introducere în fizică destinate studenților începători, publicate sub titlul *The Feynman Lectures on Physics*. În 1986 a făcut parte din Comisia Rogers care investiga dezastrul navetei spațiale Challenger și a avut cu acest prilej o apariție memorabilă la televiziune, în care, cu mijloace simple, a explicat pe înțelesul publicului larg ce s-a întâmplat. A murit în 1988. Ultimele sale cuvinte, consemnate de sora lui, au fost: „N-aș vrea să mor de două ori. E atât de plictisitor!“

Dincolo de contribuțiile sale în numeroase domenii din fizică, stilul nonconformist, mereu surprinzător, imaginația și șarmul său au făcut din Feynman figura cea mai cunoscută între fizicieni, după Einstein. În afara lucrărilor de specialitate, Feynman a scris și cărți în care își povestește cu mult umor peripețiile: *Surely You're Joking, Mr. Feynman!* și *What Do You Care What Other People Think?*

RICHARD P. FEYNMAN

# ȘASE LECȚII UȘOARE

## Bazele fizicii explicate de cel mai strălucit profesor

Text redactat de
RICHARD P. FEYNMAN,
ROBERT B. LEIGHTON și MATTHEW SANDS

Traducere din engleză de
MIHAI GAVRILĂ și OLIVIU GHERMAN



HUMANITAS
BUCUREȘTI

Coperta
IONUȚ BROȘTIANU

ISBN 978-973-50-2631-8
Descrierea CIP este disponibilă
la Biblioteca Națională a României.

RICHARD P. FEYNMAN
*Six Easy Pieces. Essentials of Physics Explained by Its Most Brilliant Teacher*
© 1963, 1989, 1995 by the California Institute of Technology
First published in the United States by Basic Books, a member of the Perseus Books Group

© HUMANITAS, 2007, 2010, pentru prezenta versiune românească

EDITURA HUMANITAS
Piața Presei Libere 1, 013701 București, România
tel. 021/408 83 50, fax 021/408 83 51
www.humanitas.ro

Comenzi Carte prin poștă: tel./fax 021/311 23 30
C.P.C.E. – CP 14, București
e-mail: cpp@humanitas.ro
www.libhumanitas.ro

# Notă asupra traducerii

În 1969, la doar șase ani după publicarea lor în America, *The Feynman Lectures on Physics* (*Cursurile de fizică ale lui Feynman*) au apărut la Editura Tehnică în trei volume masive, sub titlul *Fizica modernă*, în traducerea profesorilor Mihai Gavrilă și Oliviu Gherman. Impactul acestor cursuri neconvenționale asupra studenților și elevilor de liceu, la noi, ca și pretutindeni, a fost imens. (În engleză s-au publicat un milion și jumătate de exemplare, în rusă un milion, iar în alte limbi, în total, peste jumătate de milion.) Se simțea deci de mai mulți ani nevoia reeditării cărții lui Feynman, dar publicarea unei lucrări de mai bine de 3000 de pagini întâmpina din toate punctele de vedere mari dificultăți. Din fericire însă, în 1995, Basic Books, editorul american al lui Feynman, a tipărit un volum (*Six Easy Pieces* — trimitere la celebrul film din anii '70 *Five Easy Pieces*) conținând șase dintre lecțiile-capitole cele mai accesibile, de interes așa-zicând general, și care prin urmare se adresează unui public mai larg, constituind o cum nu se poate mai bună introducere în fizică.

Dezvoltarea fizicii a făcut ca unele afirmații din cursurile ținute de Feynman acum aproape o jumătate de secol să nu mai fie valabile azi. (În câteva cazuri, am semnalat faptul prin note de subsol.) Însă nimic din spiritul care orientează

înţelegerea fizicii şi nimic din metoda deducţiilor şi demonstraţiilor nu e depăşit. Dimpotrivă, fizica de azi are nevoie în cel mai înalt grad de „stilul Feynman“, de o privire proaspătă, fără complexul şi obsesia tiranică a formalismelor, privire care poate repune mereu totul în discuţie.

Cartea de faţă reproduce textul volumului american *Six Easy Pieces* şi foloseşte traducerile ediţiei române din 1969. Astfel, primele cinci capitole (conţinute în volumul I al ediţiei din 1969) au fost traduse de Mihai Gavrilă, iar capitolul al şaselea (din volumul III) a fost tradus de Oliviu Gherman. Nota editorului american, introducerea lui Paul Davies şi prefaţa lui David L. Goodstein şi Gerry Neugebauer au fost traduse de redactorul prezentei ediţii.

# Nota editorului american

*Șase lecții ușoare* sunt rezultatul nevoii de a oferi unui public cât mai larg un curs introductiv, substanțial, dar fără a intra în detalii tehnice, bazat pe știința lui Richard Feynman. Am ales cele mai ușoare șase capitole din celebra carte de referință a lui Feynman, *Cursuri de fizică* (publicată pentru prima dată în 1963), care rămâne în continuare cea mai cunoscută lucrare a sa. Spre norocul publicului larg, Feynman a ales să prezinte anumite subiecte-cheie în termeni mai curând calitativi, fără formule matematice, iar aceste lecții au fost reunite în prezentul volum.

Dorim să adresăm mulțumirile noastre lui Paul Davies pentru pătrunzătoarea sa introducere la această nouă ediție. În continuarea introducerii sale am ales să reproducem două prefețe la *Cursurile de fizică*, una scrisă de Feynman însuși, cealaltă de doi dintre colegii săi, deoarece ele lămuresc contextul capitolelor ce urmează și dau o imagine despre Richard Feynman și știința sa.

În fine, dorim să mulțumim Departamentului de Fizică și Arhivelor Institutului de Tehnologie din California, mai cu seamă lui Judith Goodstein și lui Brian Hatfield, pentru valoroasele și competentele lor sfaturi privind acest proiect editorial.

# Introducere

Există o idee falsă, larg răspândită, conform căreia știința e o îndeletnicire impersonală, rece și cu desăvârșire obiectivă. În timp ce majoritatea activităților umane sunt dominate de mode, capricii și personalități, știința se presupune a fi constrânsă de reguli acceptate și de teste riguroase. Doar rezultatele contează, nu și oamenii care le obțin.

Avem de-a face, evident, cu o absurditate. La fel ca toate eforturile umane, știința e o activitate condusă de oameni și se supune în aceeași măsură modelor și capriciilor. În acest caz moda nu ține atât de o alegere subiectivă, cât de felul în care savanții văd lumea. Fiecare epocă adoptă propria sa perspectivă asupra problemelor științifice, urmând de regulă calea deschisă de anumite figuri dominante care stabilesc problemele la ordinea zilei și definesc cele mai bune metode de abordare. Uneori savanții capătă o statură suficient de impunătoare pentru a fi luați în seamă de publicul larg, iar, atunci când e înzestrat cu intuiții ieșite din comun, acel savant poate deveni un simbol pentru întreaga comunitate științifică. În secolele trecute, Isaac Newton a fost un simbol. Newton întruchipa savantul gentleman — perfect informat, spirit religios, lucrând fără grabă și metodic. Acest stil de activitate științifică a reprezentat un model vreme de două sute

de ani. În prima jumătate a secolului XX, Albert Einstein l-a înlocuit pe Newton ca simbol al științei. Excentric, ciufulit, neamț, zăpăcit, absorbit total de munca lui, arhetip al gânditorului abstract, Einstein a schimbat felul de a face fizică punând în discuție înseși conceptele care definesc domeniul.

Richard Feynman a devenit un simbol al fizicii de la sfârșitul secolului XX — și a fost primul american care a ajuns la acest statut. Născut la New York în 1918 și educat pe Coasta de Est, era prea tânăr pentru a participa la Vârsta de Aur a fizicii care, în primele trei decenii ale secolului, a schimbat perspectiva noastră asupra lumii prin cele două revoluții gemene, teoria relativității și mecanica cuantică. Aceste impetuoase progrese au pus temeliile edificiului pe care îl numim azi Noua Fizică. Feynman a pornit de la aceste temelii și a ajutat la construirea primului nivel al Noii Fizici. Contribuțiile sale au atins aproape fiecare latură a domeniului și au avut o influență profundă și durabilă asupra felului în care fizicienii gândesc universul fizic.

Feynman a fost fizician teoretician prin excelență. Newton fusese în egală măsură experimentator și teoretician. Einstein privea pur și simplu cu dispreț experimentul, preferând să-și lege credința de gândirea pură. Deși a ajuns la o adâncă înțelegere teoretică a naturii, Feynman nu s-a îndepărtat niciodată de lumea reală, de multe ori impură, a rezultatelor experimentale. Nici unul din cei care l-au văzut pe Feynman la bătrânețe cum a explicat cauza dezastrului navetei spațiale Challenger scufundând un elastic în apă cu gheață nu se poate îndoi că a fost deopotrivă un spirit ludic și un gânditor foarte practic.

La început, Feynman și-a făurit un nume prin lucrările sale teoretice privind particulele subatomice, mai precis în domeniul cunoscut sub numele de electrodinamică cuantică (QED). De fapt, teoria cuantică s-a născut chiar din

această problemă. În 1900, fizicianul german Max Planck a propus ideea conform căreia lumina și celelalte radiații electromagnetice, care fuseseră considerate până atunci drept unde, se comportau paradoxal ca niște mici pachete de energie, sau „cuante“, când interacționau cu materia. Aceste cuante au fost numite fotoni. Pe la începutul anilor '30, arhitecții noii mecanici cuantice făuriseră un aparat matematic pentru a descrie emisia și absobția fotonilor de către particulele încărcate electric, cum ar fi electronii. Deși această primă formulare a electrodinamicii cuantice s-a bucurat de un succes limitat, era limpede că teoria avea fisuri. În multe cazuri, calculele dădeau răspunsuri contradictorii, ba chiar infinite, la întrebări fizice bine puse. Către sfârșitul anilor '40, tânărul Feynman și-a îndreptat atenția asupra elaborării unei teorii coerente a QED.

Pentru a așeza QED pe baze sănătoase, teoria trebuia să fie compatibilă nu numai cu principiile mecanicii cuantice, dar și cu cele ale teoriei speciale a relativității. Cele două teorii veneau fiecare cu propriul ei aparat matematic distinct, sisteme de ecuații complicate care pot fi într-adevăr combinate și reconciliate pentru a da o descriere satisfăcătoare a QED. Era o sarcină dificilă, presupunând înalte aptitudini matematice, iar aceasta a fost calea urmată de contemporanii lui Feynman. Feynman însă a ales o cale complet diferită — atât de diferită încât putea indica imediat răspunsurile fără a face apel la vreo matematică!

Pentru a realiza această capodoperă de intuiție, Feynman a inventat un sistem simplu de diagrame care îi poartă numele. Diagramele Feynman sunt un mijloc euristic simbolic, însă extrem de puternic, de a descrie ce se întâmplă cu electronii, fotonii și alte particule care interacționează între ele. În zilele noastre diagramele Feynman au ajuns un auxiliar banal al calculelor, dar la începutul anilor '50 au marcat o senzațională despărțire de calea tradițională a fizicii teoretice.

Deşi reprezentase o piatră de hotar în dezvolarea fizicii, problema elaborării unei teorii coerente a electrodinamicii cuantice era însă doar începutul. Trebuia definit un stil Feynman distinct, un stil menit să aducă cu sine o suită de rezultate importante într-un spectru larg de probleme din fizică. Stilul Feynman poate fi cel mai bine descris ca un amestec de respect şi insolenţă faţă de înţelepciunea moştenită.

Fizica este o ştiinţă exactă, iar corpul de cunoştinţe existent, deşi incomplet, nu poate fi pur şi simplu dat deoparte. Feynman a căpătat încă de foarte tânăr o formidabilă înţelegere a principiilor acceptate în fizică şi a ales să lucreze aproape exclusiv asupra problemelor convenţionale. Nu era acel tip de geniu care să se izoleze la periferia disciplinei şi să dea din întâmplare peste ceva cu totul nou. Avea talentul de a aborda subiecte ţinând de curentul principal într-o manieră neortodoxă. Aceasta însemna ocolirea formalismului existent şi dezvoltarea propriei sale abordări profund intuitive. În vreme ce majoritatea fizicienilor teoreticieni se bazează pe calcule matematice minuţioase pentru a se orienta şi a găsi un sprijin în încercarea de a ajunge la teritorii necunoscute, atitudinea lui Feynman semăna cu cea a unui cavaler. Îţi dădea impresia că putea citi natura ca pe o carte dând de ştire ce aflase fără să se împotmolească în analize migăloase.

Într-adevăr, urmându-şi preocupările în această manieră, Feynman dovedea un dispreţ sănătos faţă de formalismele riguroase. E greu de apreciat profunzimea geniului de care e nevoie pentru a lucra în felul acesta. Fizica teoretică e unul dintre cele mai dure exerciţii intelectuale, combinând noţiuni abstracte ce desfid vizualizarea cu complexitatea matematică extremă. Doar adoptând o strictă disciplină mentală pot avansa majoritatea fizicienilor. Feynman însă părea să calce în picioare codul strict al practicii şi să culeagă noi rezultate ca pe nişte fructe gata pârguite din Pomul Cunoaşterii.

Stilul Feynman datora mult personalității omului. Atât în viața profesională, cât și în cea personală părea că tratează lumea ca pe un uriaș joc distractiv. Universul fizic îi oferea o serie fascinantă de mistere și provocări, iar la fel stăteau lucrurile și cu mediul social. Pus pe șotii o viață întreagă, el trata autoritățile și forurile academice cu aceeași lipsă de respect pe care le dovedea și față de formalismul matematic îmbâcsit. Nesuportând prostia, încălca regulile de fiecare dată când le găsea arbitrare sau absurde. Scrierile sale autobiografice conțin povestiri amuzante despre felul în care Feynman păcălea serviciile de securitate însărcinate cu protejarea secretelor bombei atomice în timpul războiului, spărgea seifuri, descumpănea femei cu comportamentul său din cale-afară de îndrăzneț. A tratat și Premiul Nobel, decernat pentru contribuția sa la electrodinamica cuantică, în aceeași manieră „dacă vă place, bine, dacă nu, iar bine".

Alături de aversiunea pentru formalism, Feynman era fascinat de tot ce e insolit și obscur. Mulți își vor aduce aminte de pasiunea lui pentru țara Tuva din Asia Centrală, minunat surprinsă într-un film documentar făcut spre sfârșitul vieții. Între pasiunile sale se mai numărau tobele bongo, pictura, frecventarea cluburilor de striptease și descifrarea textelor maya.

Feynman însuși făcea mult pentru a-și cultiva personalitatea atipică. Deși se apuca cu greu de scris, era volubil în conversații și îi plăcea să spună povești despre ideile și aventurile sale. Aceste istorisiri, adunate de-a lungul anilor, i-au conferit o aură de mister și l-au făcut să devină o legendă încă din timpul vieții. Studenții, mai ales cei tineri, îl îndrăgeau pentru stilul său fermecător, iar mulți dintre ei îl idolatrizau. Când a murit de cancer în 1988, studenții de la Caltech, unde lucrase cea mai mare parte a carierei sale, au desfășurat un banner cu un mesaj simplu: „Te iubim, Dick."

Felul detașat în care aborda viața în general și fizica în particular a făcut din el un om care știa minunat să comunice.

Nu prea avea timp să ţină cursuri formale sau să conducă lucrările de doctorat ale studenţilor. Şi totuşi putea preda lecţii strălucite atunci când subiectul îl atrăgea, folosind întreaga sa inteligenţă sclipitoare, intuiţia profundă şi nonconformismul cu care venea din activitatea sa de cercetare.

La începutul anilor '60 Feynman a acceptat să predea un curs de introducere în fizică studenţilor din primii doi ani de la Caltech. A făcut-o cu exuberanţa-i caracteristică şi cu amestecul său inimitabil de nonconformism, farmec şi umor extravagant. Din fericire, aceste nepreţuite cursuri au fost păstrate pentru posteritate sub forma unei cărţi. Deşi complet diferite ca stil şi prezentare de manualele convenţionale, *Cursurile de fizică* ale lui Feynman au avut un imens succes şi au stimulat şi inspirat o întreagă generaţie de studenţi din toată lumea. După trei decenii, nimic din strălucirea şi limpezimea acestor volume nu s-a pierdut. *Şase lecţii uşoare* sunt extrase direct din *Cursurile de fizică*. Rostul acestei cărţi este de a da publicului larg o imagine reprezentativă a Dascălului Feynman, prezentând capitolele introductive, mai puţin tehnice, din această lucrare de referinţă. Rezultatul e un minunat volum, care poate sluji deopotrivă ca iniţiere în fizică pentru nespecialişti şi apropiere de personalitatea lui Feynman.

Ce impresionează mai mult la expunerea atent elaborată a lui Feynman este felul în care reuşeşte să explice noţiuni avansate din fizică pornind de la un număr redus de concepte şi de la un jargon matematic şi tehnic minim. Avea iscusinţa de a găsi analogia potrivită sau ilustrarea din viaţa de zi cu zi pentru a dezvălui esenţa unui principiu profund, fără să-l ascundă în spatele detaliilor accidentale ori irelevante.

Selecţia subiectelor conţinute în acest volum nu se doreşte a fi o trecere în revistă exhaustivă a fizicii moderne, ci o mărturie laborioasă pentru felul în care Feynman aborda

problemele. Descoperim de îndată cum poate el limpezi subiecte banale, precum forță sau mișcare, prin perspective noi. Conceptele-cheie sunt ilustrate cu exemple din viața de zi cu zi sau din trecut. Fizica e în permanență legată de alte științe, fără ca să planeze pentru vreo clipă îndoiala asupra faptului că fizica e disciplina fundamentală.

Chiar de la începutul celor *Șase lecții ușoare* aflăm că la temelia întregii fizici stă noțiunea de lege — existența unui univers ordonat care poate fi înțeles pe calea gândirii raționale. Dar la legile fizicii nu se poate ajunge direct prin observarea naturii. Ele sunt exasperant de bine ascunse, criptate subtil în fenomenele pe care le studiem. Procedeele tainice ale fizicianului — un amestec de experimente atent proiectate și de teoretizări matematice — sunt necesare pentru a dezvălui realitatea subiacentă care se supune unor legi.

Probabil că cea mai bine cunoscută lege din fizică e legea lui Newton conform căreia gravitația scade cu pătratul distanței, prezentată aici în capitolul cinci. Subiectul e introdus în contextul sistemului solar și al legilor lui Kepler privind mișcarea planetelor. Dar gravitația e universală, se aplică în întreg cosmosul și îi dă ocazia lui Feynman să-și condimenteze prezentarea cu exemple din astronomie și cosmologie. Comentând fotografia unei îngrămădiri globulare de stele ținută laolaltă de forțe nevăzute, devine poetic: „Cine nu vede gravitația acționând aici n-are suflet."

Alte legi cunoscute se referă la diferite forțe negravitaționale din natură, care descriu interacțiile dintre particulele de materie. Există însă numai câteva asemenea forțe, iar Feynman însuși se bucură de privilegiul de a fi unul dintre puținii savanți din istorie care au descoperit o nouă lege a fizicii, lege privind felul în care forța nucleară slabă afectează comportamentul unor particule subatomice.

Fizica particulelor la energii înalte, deopotrivă grandioasă și seducătoare, cu uriașele ei acceleratoare și lista parcă fără

sfârșit de particule subatomice nou-descoperite, reprezintă giuvaierul din coroana științei postbelice. Cercetările lui Feynman au fost orientate mai cu seamă spre lămurirea rezultatelor din acest domeniu. Rolul simetriilor și legilor de conservare în ordonarea faunei subatomice a reprezentat o importantă temă comună de cercetare pentru specialiștii din fizica particulelor.

Multe din simetriile studiate de fizicienii care se ocupă de particulele elementare erau însă deja bine cunoscute în fizica clasică. Între ele, un rol aparte îl joacă simetriile generate de omogenitatea spațiului și a timpului. Să considerăm, de pildă, timpul: în afară de cosmologie, unde big bang-ul marchează începutul timpului, nimic din fizică nu ne face să distingem între un moment de timp și cel următor. Fizicienii spun că lumea e „invariantă în raport cu translațiile temporale", ceea ce înseamnă că, indiferent dacă în măsurători iei ca moment zero miezul nopții sau miezul zilei, descrierea fenomenelor fizice rămâne aceeași. Procesele fizice nu depind de un zero absolut al timpului. Se dovedește că această simetrie în raport cu translația temporală are drept consecință una dintre cele mai elementare și mai utile legi din fizică: legea conservării energiei. Această lege spune că poți deplasa energie sau îi poți schimba forma, dar nu poți s-o creezi sau s-o distrugi. Feynman explică limpede această lege spunând povestea nostimă a lui Dan, un băiețel pus pe șotii care își ascunde cuburile de mama lui (capitolul patru).

Cea mai incitantă lecție din volum este ultima — o prezentare a mecanicii cuantice. Nu e nici o exagerare în afirmația că mecanica cuantică a dominat fizica secolului XX și că, între teoriile științifice în vigoare, este de departe încununată de succesul cel mai mare. E indispensabilă dacă vrem să înțelegem particulele subatomice, atomii și nucleele, moleculele și legăturile chimice, structura solidelor, supraconductorilor și suprafluidelor, conductibilitatea

electrică și termică a metalelor și semiconductorilor, structura stelelor și multe altele. Are aplicații practice de la laseri la circuitele integrate. Toate acestea apărute dintr-o teorie care la prima vedere — și la a doua — pare absolut nebunească! Niels Bohr, unul din întemeietorii mecanicii cuantice, remarca odată că acela care nu e șocat de teorie n-a priceput-o.

Problema e că ideile mecanicii cuantice lovesc chiar în inima a ceea ce am putea numi realitatea de bun-simț. În particular, ideea că obiectele fizice precum electronii sau atomii au o existență independentă, cu un set complet de proprietăți fizice la orice moment de timp, e pusă sub semnul întrebării. De exemplu, un electron nu poate avea în același moment o poziție în spațiu și o viteză bine definite. Dacă vrei să determini poziția electronului îl găsești într-un loc din spațiu, iar dacă îi măsori viteza obții un răspuns precis, însă nu poți face ambele observații în același timp. Nu are sens nici să atribui valori definite, dar necunoscute, pentru poziția și viteza unui electron în absența unui set complet de observații.

Acest indeterminism care ține de însăși natura particulelor atomice e înglobat în celebrul principiu de incertitudine al lui Heisenberg. El impune limite stricte preciziei cu care proprietăți precum poziția și viteza pot fi simultan cunoscute. O valoare exactă pentru poziție distruge spectrul valorilor posibile pentru viteză și viceversa. Imprecizia cuantică se vădește în felul în care electronii, fotonii și alte particule se mișcă. Anumite experimente pot pune în evidență faptul că ele urmează drumuri bine definite în spațiu, așa cum gloanțele își urmează traiectoria spre țintă. Dar alte condiții experimentale dezvăluie că aceste entități se pot de asemenea comporta ca niște unde, prezentând tipare caracteristice de difracție și interferență.

Superba analiză pe care Feynman o face celebrului experiment „cu două fante“, care surprinde „șocanta“ dualitate

undă–particulă în forma ei cea mai izbitoare, a devenit o piesă clasică în istoria expunerilor științifice. Pornind de la câteva idei simple, Feynman izbutește să-l aducă pe cititor chiar în inima misterului cuantic și ne uimește prin natura paradoxală a realității pe care o prezintă.

Deși manuale de mecanică cuantică existau încă de la începutul anilor '30, e tipic pentru Feynman faptul că, tânăr fiind, a preferat să remodeleze teoria pentru sine într-un chip cu totul nou. Metoda lui Feynman are meritul de a ne pune la dispoziție o imagine vie a felului în care funcționează șiretlicul cuantic. Ideea este că, în mecanica cuantică, drumul unei particule prin spațiu nu este în general bine definit. Ne putem închipui, de pildă, că un electron care se mișcă liber nu călătorește pur și simplu în linie dreaptă între A și B, așa cum bunul-simț ne-ar face să bănuim, ci urmează o mulțime de căi ocolite. Feynman ne îndeamnă să ne închipuim că, într-un fel, electronul explorează toate drumurile posibile, iar, în absența unei observații care să arate ce cale e urmată, trebuie să presupunem că toate aceste drumuri alternative contribuie cumva la realitate. Astfel, atunci când un electron ajunge într-un punct din spațiu — de pildă, la ecranul-țintă —, mai multe istorii diferite trebuie integrate pentru a crea acest eveniment.

Așa-numita integrală de drum a lui Feynman, sau abordarea mecanicii cuantice prin suma istoriilor, face din această idee remarcabilă un procedeu matematic. Ani de-a rândul a rămas oarecum ca o curiozitate, dar pe măsură ce fizicienii au împins mecanica cuantică spre limitele ei — aplicând-o gravitației și chiar cosmologiei —, s-a dovedit că abordarea lui Feynman oferă cel mai bun mijloc de calcul pentru descrierea universului cuantic. Istoria va arăta probabil că, între numeroasele sale contribuții remarcabile în fizică, formularea mecanicii cuantice în termeni de integrale de drum este cea mai semnificativă.

Multe din ideile prezentate în acest volum au un caracter profund filozofic. Și totuși Feynman îi privea cu suspiciune pe filozofi. Am avut odată prilejul să-l abordez pe tema legăturii dintre natura matematicii și legile fizicii și să-l întreb dacă s-ar putea considera că legile matematice abstracte au o existență platoniciană independentă. Plin de subtilitate și de spirit, mi-a arătat că într-adevăr așa păreau să stea lucrurile, dar a dat imediat înapoi de îndată ce l-am îndemnat să adopte o anume poziție filozofică. La fel de prudent a fost și când am încercat să-l provoc pe tema reducționismului. Îndrăznesc să afirm că, în fond, Feynman nu disprețuia problemele filozofice. Dar, așa cum era în stare să facă foarte bine fizică matematică, fară a-și sistematiza matematica, putea avea intuiții filozofice subtile, fără vreo filozofie sistematică. Ce îl deranja era formalismul, nu conținutul.

E puțin probabil să mai apară un alt Richard Feynman. Era în mare măsură un om al timpului său. Stilul Feynman se potrivea perfect cu un subiect care se afla în procesul de consolidare a unei revoluții și începea explorarea consecințelor lui îndepărtate. Fizica postbelică era bine fixată în temeliile sale, matură în structurile teoretice, dar larg deschisă către cercetarea posibilelor aplicații. Feynman a intrat în lumea fermecată a conceptelor abstracte și și-a pus amprenta gândurilor lui asupra multora dintre ele. Această carte oferă șansa unică de a arunca o privire în mintea unuia dintre oamenii cei mai remarcabili.

Septembrie 1994 PAUL DAVIES

# Prefață*

Către sfârșitul vieții sale, renumele lui Richard Feynman a depășit granițele comunității științifice. Aparițiile sale în calitate de membru al comisiei care investiga dezastrul navetei spațiale Challenger l-au făcut cunoscut publicului larg; de asemenea, un bestseller istorisind aventurile sale picarești i-a atras o popularitate comparabilă poate cu cea a lui Albert Einstein. Dar încă din 1961, înainte chiar ca Premiul Nobel să-i aducă notorietatea, Feyman era mai mult decât celebru printre membrii comunității științifice — era deja o legendă. Excepționalele sale înzestrări de profesor au contribuit fără îndoială la răspândirea și îmbogățirea legendei lui Richard Feynman.

A fost într-adevăr un mare profesor, poate cel mai mare profesor al timpurilor noastre. Pentru Feynman, sala de curs era un teatru, iar profesorul un actor care se ocupa nu doar cu fapte și cifre, ci și cu arta dramatică și focurile de artificii. Se plimba întruna în fața sălii, fluturându-și brațele, „combinația imposibilă de fizician teoretician și prezentator de circ, la fiecare pas mișcare corporală și efecte sonore", după cum scria *New York Times*. Fie că se adresa studenților, colegilor

* Prefață publicată în ediția din 1989 a *Cursurilor de fizică ale lui Feynman*. (*N. red.*)

sau publicului larg, pentru cei care au avut norocul să-l vadă pe Feynman ţinând conferinţe experienţa era întotdeauna neconvenţională şi imposibil de uitat, aşa cum era şi persoana sa.

Avea mari talente actoriceşti, era expert în captarea atenţiei oricărui public. Cu mulţi ani în urmă, preda un curs avansat de mecanică cuantică în faţa unei audienţe numeroase, compusă din câţiva studenţi din anii superior şi aproape întreaga facultate de fizică de la Calltech. În timpul unei lecţii, Feynman a început să explice cum pot fi reprezentate anumite integrale complicate sub forma unor diagrame: timpul pe axa asta, spaţiul pe cealaltă axă, linii şerpuite pentru linia asta dreaptă etc. După ce a descris ceea ce e cunoscut în lumea fizicii ca diagramă Feynman, s-a întors spre clasă, zâmbind ştrengăreşte: „Iar asta se numeşte DIAGRAMA!" Feynman ajunsese la deznodământ, iar sala a izbucnit în aplauze spontane.

Ani de-a rândul după ce predase lecţiile care alcătuiesc acestă carte, Feynman ţinea din când în când câte un curs pentru studenţii din anii mici. Evident, apariţiile sale trebuiau ţinute în secret aşa încât studenţii înscrişi la cursuri să aibă loc în sală. La una din aceste lecţii subiectul era spaţiul-timp curb, iar Feynman era strălucitor ca de obicei. Dar momentul de neuitat s-a petrecut la începutul lecţiei. Tocmai fusese descoperită supernova din 1987 şi Feynman era foarte emoţionat. A spus: „Tycho Brache a avut supernova lui, la fel şi Kepler. Timp de patru sute de ani n-au mai apărut supernove. Dar acum am şi eu supernova mea!" Publicul a rămas mut, iar Feynman a continuat: „Există $10^{11}$ stele în galaxie. Părea să fie un număr *uriaş*. Dar nu-i decât o sută de miliarde. E mai mic decât deficitul naţional! Pe vremuri li se spunea numere astronomice. Acum ar trebui să se cheme numere economice." Clasa a izbucnit în râs, iar Feynman, după ce captase atenţia publicului, şi-a continuat lecţia.

Lăsând la o parte latura actoricească, tehnica pedagogică a lui Feynman era simplă. Într-o însemnare făcută în 1952, pe când se afla în Brazilia, și găsită printre hârtiile sale în arhivele Caltech, se află rezumată concepția didactică a lui Feynman:

„Întâi de toate trebuie să înțelegi de ce vrei ca studenții să învețe subiectul și ce anume vrei ca ei să afle, iar metoda va rezulta mai mult sau mai puțin prin bun-simț."

Prin „bun-simț", Feynman ajungea deseori la răsturnări spectaculoase de perspectivă care surprindeau perfect esența a ceea ce voia să demonstreze. Odată, în timpul unei lecții, încerca să explice de ce o idee nu trebuie verificată folosind aceleași date care o sugeraseră de la bun început. Părând că se îndepărtează de subiect, Feynman s-a apucat să vorbească despre plăcuțele de înmatriculare ale mașinilor. „Azi mi s-a întâmplat un lucru extraordinar. Venind încoace ca să țin lecția, am trecut prin parcare. Și n-o să vă vină să credeți ce mi s-a întâmplat. Am văzut o mașină cu plăcuța de înmatriculare ARW 357. Vă dați seama? Dintre milioanele de plăcuțe de înmatriculare din statul nostru, ce șansă aveam ca azi s-o văd tocmai pe asta? Uluitor!" Un lucru pe care chiar și unii savanți abia reușesc să-l înțeleagă a devenit limpede prin remarcabilul „bun-simț" al lui Feynman.

În 35 de ani la Caltech (din 1952 până în 1987), Feynman a ținut 34 de cursuri. 25 dintre ele au fost cursuri avansate, destinate strict studenților din anii terminali, dar la care puteau cere să participe și studenții din anii mici (iar de cele mai multe ori li se permitea). Celelalte au fost în general cursuri introductive destinate studenților din anii mai mari. O singură dată a ținut Feynman cursuri pentru stundenții începători, în anii universitari 1961–62, 1962–63, cu o scurtă reluare în 1964, iar acesta a fost celebrul prilej care a stat la

baza *Cursurilor de fizică ale lui Feynman* (*The Feynman Lectures on Physics*).

Exista pe atunci un consens la Caltech: primii doi ani în care studenții erau obligați să învețe fizică, în loc să-i stimuleze, mai mult îi inhibau. Pentru a îndrepta acestă situație, Feynman a fost rugat să conceapă o serie de lecții destinate studenților din primii doi ani. De îndată ce a acceptat, s-a hotărât ca lecțiile să fie transcrise în vederea publicării. Misiunea s-a dovedit mult mai anevoioasă decât se putea închipui. Pentru a face publicabilă cartea, a fost nevoie de un volum imens de muncă din partea colegilor săi, precum și din partea lui Feynman însuși, care a redactat versiunea finală a fiecărui capitol.

Mai trebuiau rezolvate și problemele practice legate de curs. Sarcina a fost mult îngreunată de faptul că Feynman stabilise numai un plan vag în privința lecțiilor. Asta însemna că nimeni nu știa ce va spune Feynman înainte ca el să apară în fața auditoriului și să înceapă să vorbească. Profesorii de la Caltech care îl asistau trebuiau să se descurce pe loc cu detaliile terestre, cum ar fi alcătuirea problemelor pentru acasă.

De ce și-a închinat Feynman mai bine de doi ani revoluționării modului de a preda fizica elementară? Nu putem face decât speculații, dar există probabil trei motive esențiale. Primul a fost că îi plăcea să aibă un public, iar astfel i se oferea un teatru mai mare decât avea de obicei la cursurile cu studenții din anii superiori. Al doilea motiv a fost că ținea cu adevărat la studenți și credea că e important să predai lecții începătorilor. Al treilea, și poate cel mai serios motiv, a fost pur și simplu provocarea de a reformula fizica, așa cum o înțelegea el, astfel încât să poată fi prezentată tinerilor studenți. Feynman a fost odată rugat de un asistent de la Caltech să explice de ce particulele cu spin 1/2 se supun statisticii Fermi-Dirac. A măturat cu privirea sala și a zis:

„Am să pregătesc o lecție pentru începărtori pe tema asta." Dar, câteva zile mai târziu, s-a întors și a spus: „Îmi pare rău, n-am reușit. N-am putut să reduc problema la nivel de începător. Asta înseamnă că n-o înțelegem cu adevărat."

Talentul de a reduce idei profunde la termeni simpli, inteligibili, e evident de-a lungul *Cursurilor de fizică ale lui Feynman*, dar nicăieri nu apare atât de pregnant ca în prezentarea pe care o face mecanicii cuantice. Pentru specialiști, e limpede ce a reușit aici. A prezentat studenților începători metoda integralei de drum, tehnica născocită chiar de el, prin care a rezolvat cele mai delicate probleme din fizică. Lucrările sale științifice în care a folosit integralele de drum i-au adus, între altele, Premiul Nobel din 1965, împărțit cu Julian Schwinger și Sin-Itero Tomonaga.

Mulți dintre studenții și cadrele didactice ale facultății care au asistat la cursuri păstrează în memorie acei doi ani de fizică petrecuți împreună cu Feynman ca pe un moment care le-a marcat întreaga viață. Pe atunci însă, lucrurile păreau să stea altfel. Mulți studenți erau înspăimântați de lecții, iar, pe măsură ce ele înaintau, prezența studenților înscriși la curs scădea dramatic. Dar, în același timp, începeau să vină tot mai multe cadre didactice și studenți din anii mari. Sala rămânea plină, și poate că Feynman n-a aflat niciodată că îi pierdea pe aceia cărora le erau destinate lecțiile. Însă, chiar și din perspectiva lui Feynman eforturile sale pedagogice n-au fost încununate de succes. În prefața din 1963 a *Cursurilor*, el scria: „Nu cred că am reușit prea bine." Recitind cartea ai uneori senzația că Feynman privește peste umăr nu către tinerii cititori, ci către colegii săi, spunând: „Ia uite! Uite ce abilă prezentare am găsit! E o treabă isteață, nu-i așa?" Chiar dacă își închipuia că explică lucrurile clar pentru studenții începători, ei nu puteau trage folosul maxim de aici. Egalii lui — savanții, fizicienii și profesorii — erau principalii beneficiari ai superbei sale realizări, care

însemna nici mai mult, nici mai puțin decât să vezi fizica din perspectiva proaspătă și dinamică a lui Feynman.

Feynman a fost mai mult decât un mare profesor. A avut darul de a fi un extraodinar profesor al profesorilor. Dacă scopul *Cursurilor de fizică ale lui Feynman* a fost să pregătească o sală plină cu studenți începători pentru rezolvarea problemelor de la examen, nu se poate spune că a reușit prea bine. Mai mult, dacă cursul tipărit se dorea a servi drept manual introductiv pentru colegiu, scopul n-a fost atins. Și totuși, cărțile au fost traduse în zece limbi străine și sunt disponibile în patru ediții bilingve. Feynman însuși credea că principala sa contribuție în fizică nu era nici electrodinamica cuantică, nici teoria heliului suprafluid, a polaronilor sau a partonilor. Principala sa contribuție erau cele trei volume roșii conținând *Cursurile de fizică ale lui Feynman*. Această credință justifică pe deplin publicarea ediției omagiale a faimoasei cărți.

DAVID L. GOODSTEIN
GERRY NEUGEBAUER
Aprilie 1989 Institutul de Tehnologie din California

# Prefața lui Feynman

Acesta este cursul de fizică pe care l-am predat, în cei doi ani care au trecut, studenților din anii I și II de la Caltech. Desigur, lecțiile nu sunt redate cuvânt cu cuvânt — uneori ele au fost masiv prelucrate, alteori în mai mică măsură. Lecțiile formează doar o parte a cursului integral. Acesta a fost audiat de un grup de 180 de studenți, care se întruneau de două ori pe săptămână într-un amfiteatru mare, apoi se împărțeau în grupe de 15–20 de studenți pentru ședințe de seminar sub conducerea unui asistent. În plus, o dată pe săptămână avea loc o ședință de laborator.

Scopul principal al acestui curs a fost de a trezi interesul studenților entuziaști și capabili care veneau la Caltech de pe băncile școlilor medii. Aceștia auzeau o mulțime de lucruri despre cât de interesantă și captivantă e fizica — teoria relativității, mecanica cuantică și alte teorii moderne. Dar după ce urmau timp de doi ani acest curs, așa cum era predat anterior, mulți se simțeau descurajați, deoarece în realitate li se prezentau prea puține din ideile grandioase, noi, moderne. Erau puși să studieze planul înclinat, electrostatica și așa mai departe, iar după doi ani erau cuprinși de dezamăgire. S-a pus întrebarea dacă este sau nu posibil să fie conceput un curs care să-l salveze pe studentul mai avansat și mai capabil, menținându-i entuziasmul.

Cursul de faţă nu urmăreşte să acopere toate domeniile fizicii, dar pune probleme foarte dificile. M-am gândit să mă adresez celor mai inteligenţi dintre auditori şi să mă asigur, dacă se poate, că până şi aceştia vor întâmpina dificultăţi în a cuprinde întreg conţinutul cursului, sugerând aplicarea ideilor şi conceptelor în diverse direcţii studiate, în afara direcţiei principale de atac. Cu toate acestea, am încercat cu insistenţă să fac expunerea cât mai precisă, subliniind în fiecare caz cum sunt încorporate în fizică formulele matematice şi ideile şi în ce sens vor putea fi ele modificate odată cu acumularea de noi cunoştinţe. De asemenea, am simţit că pentru aceşti studenţi e important să se indice ce ar trebui ei să fie în stare să deducă (dacă sunt suficient de ageri) din cele ce ştiau dinainte şi ce era prezentat pentru prima oară. Când apărea câte o idee nouă, încercam fie s-o deduc, dacă putea fi dedusă, fie să explic că este o idee într-adevăr nouă, care nu se baza pe lucruri învăţate anterior şi nu putea fi demonstrată.

La începutul acestui curs presupun că studenţii cunosc anumite lucruri din liceu — cum ar fi optica geometrică, ideile de bază ale chimiei etc. De asemenea, nu văd nici un motiv care să mă oblige să ţin lecţiile într-o anumită ordine strictă, în sensul că nu aş avea nevoie să menţionez un fapt până când nu aş fi în stare să-l discut în detaliu. Am menţionat cu anticipaţie, fără o discuţie completă, o mulţime de probleme. Discuţia completă urmează mai târziu, într-un stadiu mai avansat al cursului. Ca exemple pot fi date noţiunile de inductanţă şi nivele de energie atomice, prezentate mai întâi într-un mod esenţialmente calitativ şi dezvoltate apoi mai pe larg.

În timp ce mă adresam studentului activ, doream de asemenea să mă ocup şi de cel pentru care rafinamentele şi aplicaţiile colaterale nu produc decât îngrijorare şi care de la bun început este de aşteptat că nu va putea asimila mare parte a materialului din curs. Pentru un asemenea student am vrut să existe cel puţin un nucleu central sau un fir conducător

pe care să-l poată urma. Chiar dacă nu va înțelege totul din curs, sper că nu îl voi înfuria. Nu îi cer să înțeleagă totul, ci doar ideile cele mai directe și centrale. Desigur, e necesară o anumită doză de inteligență din partea sa, pentru a vedea care sunt ideile și teoremele principale și care sunt problemele mai avansate, colaterale, eventual aplicațiile pe care le poate înțelege numai în anii următori.

În timpul predării acestui curs a existat o dificultate majoră: în condițiile în care a fost ținut cursul, nu am avut nici o informație asupra reacției studenților, care să indice cât de bine se desfășoară lecțiile. Aceasta a fost o dificultate foarte serioasă, astfel încât nu știu de fapt cât de bun e în realitate cursul. Totul a fost în esență un experiment, iar dacă ar fi să-l repet, n-aș mai face-o în același fel — dar sper să nu mai trebuiască să-l repet! Cred totuși că, în privința fizicii, în primul an lucrurile s-au desfășurat mulțumitor.

În anul al doilea nu am mai fost atât de mulțumit. În prima parte a cursului, referitoare la electricitate și magnetism, nu am putut imagina un mod cu adevărat unic și deosebit de predare — sau unul care să fie semnificativ mai interesant decât cel obișnuit. Prin urmare, nu cred că am realizat prea mult în lecțiile despre electricitate și magnetism. Inițial avusesem intenția ca la sfârșitul anului al doilea, după electricitate și magnetism, să continui cursul ținând câteva lecții despre proprietățile materialelor și, mai ales, să tratez probleme cum ar fi oscilațiile proprii, soluțiile ecuației difuziei, sisteme oscilante, funcții ortogonale etc., dezvoltând primele etape a ceea ce e cunoscut sub numele de „metode matematice ale fizicii". Privind retrospectiv, cred că dacă aș mai ține o dată cursul m-aș întoarce la această idee inițială, însă, fiindcă nu s-a pus problema să mai țin încă o dată acest curs, s-a sugerat că ar fi bine să prezint o introducere în mecanica cuantică; ea se găsește în volumul III.

Este absolut clar că studenții care aleg fizica drept specialitate pot aștepta până în anul III pentru a studia mecanica

cuantică. Pe de altă parte, s-a adus argumentul că pentru mulți dintre studenții care urmează acest curs fizica reprezintă doar un cadru pentru preocupările lor primordiale din alte domenii. Modul obișnuit de a preda mecanica cuantică face însă ca acest capitol să fie aproape inabordabil pentru marea majoritate a studenților, deoarece le cere foarte mult timp. Cu toate acestea, în aplicațiile sale (în special în aplicațiile mai complexe, cum ar fi electrotehnica și chimia) nu se utilizează de fapt întregul aparat al ecuațiilor diferențiale. Ca urmare, am încercat să descriu principiile mecanicii cuantice într-un mod care să nu ceară o cunoaștere prealabilă a teoriei ecuațiilor cu derivate parțiale. Cred că încercarea de a prezenta mecanica cuantică în această manieră neobișnuită e interesantă chiar și pentru fizicieni — din motive ce vor rezulta din lecțiile înseși. Cred totuși că experimentul făcut cu predarea mecanicii cuantice nu a fost complet reușit, în mare măsură fiindcă spre sfârșit nu am avut suficient timp. (De exemplu, ar fi trebuit să mai am încă trei sau patru ședințe pentru a trata mai pe larg probleme ca benzile de energie și dependența spațială a amplitudinilor.) De asemenea, fiindcă nu mai prezentasem niciodată subiectul în acest mod, necunoașterea reacției studenților a fost o dificultate serioasă. Acum cred că mecanica cuantică trebuie predată mai târziu. Poate voi avea cândva ocazia s-o predau din nou. Atunci o voi face mai bine.

Motivul pentru care nu există lecții despre felul în care trebuie rezolvate problemele este că nu am ținut ședințe de seminar. Deși în primul an am avut trei lecții privind modul de rezolvare a problemelor, ele nu sunt incluse aici. A mai existat o lecție despre navigația inerțială, care se situează după lecția referitoare la sistemele în rotație, dar care din nefericire a fost omisă. Lecțiile 5 și 6 le-a ținut Matthew Sands, întrucât eu am fost absent atunci.

Se pune desigur întrebarea: cât de bine a reușit acest experiment? Punctul meu de vedere e pesimist, însă el nu e

împărtășit de cea mai mare parte a celor care au lucrat cu studenții. Nu cred că am reușit prea bine. Având în vedere felul în care majoritatea studenților au tratat problemele la examene, mă gândesc că sistemul a dat greș. Prietenii mei îmi atrag atenția că au existat vreo zece–douăzeci de studenți care — în mod surprinzător — au înțeles aproape toată materia din curs și au studiat-o intens, preocupându-se de diferitele probleme cu entuziasm și interes. Cred că aceștia au acum o cultură generală solidă în fizică — și sunt, în definitiv, cei cărora m-am adresat în primul rând. Dar „puterea educației are rareori o mare eficacitate, cu excepția cazurilor fericite în care ea este aproape inutilă“ (Gibbons).

Totuși, nu am vrut să las să rămână în urmă nici un student, așa cum poate că s-a întâmplat în realitate. Cred că un mod de a-i ajuta mai mult pe studenți ar fi să se depună mai multe eforturi pentru elaborarea unei culegeri de probleme cât mai bune, care să lămurească unele idei din curs. Problemele oferă o bună ocazie de a completa materialul cursului, iar ele concretizează, completează și fixează în minte ideile expuse.

Cred însă că problema educației n-are soluție decât dacă înțelegi că modul optim de predare presupune cu necesitate o legătură directă între student și un profesor bun — situație în care studentul discută și meditează asupra ideilor. E imposibil să înveți prea multe asistând pur și simplu la un curs, sau chiar rezolvând problemele care îți sunt indicate. Dar în timpurile noastre moderne avem atât de mulți studenți cărora trebuie să le predăm, încât trebuie să încercăm să găsim un substitut pentru soluția ideală. Poate că acest curs va aduce o oarecare contribuție. Poate că undeva, într-un loc mai retras, unde există o legătură strânsă între profesor și studenți, aceștia vor putea extrage din el unele idei și sugestii. Poate că le va face plăcere să-l înțeleagă sau să-l dezvolte mai departe.

Iunie 1963 RICHARD P. FEYNMAN

# 1
# Atomi în mișcare

## INTRODUCERE

Acest curs de fizică de doi ani este conceput considerând că dumneata, cititorule, vei deveni fizician. Desigur, nu e absolut necesar, dar asta presupune orice profesor, de orice specialitate ar fi el! Dacă vei deveni fizician, vei avea mult de studiat: cei două sute de ani ai domeniului de cunoaștere care se dezvoltă cel mai rapid dintre toate câte există. Atât de multe cunoștințe încât ai putea crede că n-o să le poți învăța în patru ani și, de fapt, nici n-ai să poți; va trebui să urmezi și cursuri de specializare.

E surprinzător faptul că, în ciuda imensei cantități de muncă depusă în tot acest răstimp, e posibil să se condenseze într-o mare măsură această enormă cantitate de rezultate, găsindu-se *legi* care rezumă toată cunoașterea noastră. Totuși, legile sunt atât de greu de înțeles încât ar fi incorect față de dumneata dacă am porni în explorarea acestui vast subiect fără un plan sau o schiță a relațiilor dintre o ramură a științei și alta. De aceea, conform acestor observații preliminare, primele trei capitole vor schița legătura fizicii cu restul științelor, legăturile științelor una cu alta și semnificația generală a științei, pentru a ne ajuta să căpătăm o „intuiție“ a subiectului.

Ai putea să te întrebi de ce nu se poate preda fizica dând legile de bază pe prima pagină şi apoi arătând cum se aplică ele în toate împrejurările posibile, aşa cum se face în geometria euclidiană, unde se enunţă axiomele, iar apoi se fac tot felul de deducţii. (Astfel, nemulţumit că trebuie să înveţi fizica în patru ani, ai vrea s-o înveţi în patru minute?) Nu putem proceda aşa din două motive. Mai întâi, nu *cunoaştem* încă toate legile fundamentale: există o frontieră a necunoaşterii care se extinde. În al doilea rând, enunţarea corectă a legilor fizicii implică unele idei foarte puţin obişnuite, care cer o matematică avansată pentru descrierea lor. De aceea e nevoie de o importantă pregătire prealabilă chiar şi pentru a înţelege ce semnificaţie au *cuvintele*. Nu, nu e posibil să procedăm în felul acesta. Putem înainta doar din aproape în aproape.

Fiecare element sau parte din întregul naturii reprezintă întotdeauna doar o *aproximaţie* a adevărului întreg sau, mai bine spus, a adevărului întreg în măsura în care îl cunoaştem noi. De fapt, tot ce cunoaştem e numai un fel de aproximaţie, fiindcă *ştim că nu ştim încă toate legile.* De aceea, lucrurile trebuie învăţate doar pentru a fi dezvăţate din nou sau, mai probabil, pentru a fi corectate.

Principiul ştiinţei, aproape definiţia ei, este: *Testul oricărei cunoaşteri e experimentul.* Experimentul e singurul judecător al „adevărului" ştiinţific. Dar care-i sursa cunoaşterii? De unde vin legile care trebuie verificate? Experienţa însăşi ajută la găsirea acestor legi, în sensul că ne dă sugestii. Dar e de asemenea necesară multă *imaginaţie* pentru a obţine din aceste sugestii marile generalizări — pentru a ghici minunatele, simplele, dar foarte straniile structuri aflate în spatele tuturor, iar apoi a experimenta, spre a verifica iarăşi dacă am ghicit bine. Acest proces de imaginare este atât de dificil încât a dus la o diviziune a muncii în fizică: există fizicieni *teoreticieni* care imaginează, deduc şi ghicesc noile

legi, dar nu fac experienţe; şi apoi, există fizicieni *experimentatori* care experimentează, imaginează, deduc şi ghicesc.

Am spus că legile naturii sunt aproximative: că întâi le găsim pe cele „greşite", iar apoi le găsim pe cele „corecte". Dar cum poate fi o experienţă „greşită"? În primul rând, într-un mod banal: dacă ceva nu e în ordine cu aparatul şi nu ai băgat de seamă. Dar aceste lucruri pot fi uşor puse la punct, verificând minuţios aparatura. Aşa că, fără a ne lega astfel de lucruri minore, cum *pot* fi greşite rezultatele unei experienţe? Doar fiind neprecise. De exemplu, masa unui obiect nu pare să se schimbe vreodată: un titirez care se învârteşte are aceeaşi greutate ca şi unul în repaus. Astfel, a fost inventată o „lege": masa este constantă, independentă de viteză. Se constată că această „lege" este incorectă. Se dovedeşte că masa creşte cu viteza, dar creşterile apreciabile necesită viteze apropiate de cea a luminii. O lege *adevărată* este următoarea: dacă un obiect se mişcă cu o viteză mai mică decât 100 kilometri pe secundă, masa rămâne constantă în limita unei milionimi din valoarea ei. Într-o astfel de formă aproximativă, aceasta e o lege corectă. Ne-am putea gândi că în practică noua lege nu aduce vreo diferenţă semnificativă. Da şi nu. Pentru viteze obişnuite o putem desigur uita şi folosi legea simplă a masei constante, cu o bună aproximaţie. Dar la viteze mari greşim, şi greşim cu atât mai mult cu cât viteza e mai mare.

În sfârşit, şi deosebit de interesant, *din punct de vedere filozofic greşim complet* cu legea aproximativă, întreaga imagine pe care o avem asupra lumii trebuie modificată chiar dacă masa se modifică numai cu foarte puţin. Acesta e un lucru caracteristic pentru filozofia, sau ideile, din spatele legilor. Chiar un efect foarte mic reclamă uneori schimbări profunde în ideile noastre.

Atunci, ce să studiem mai întâi? Să studiem legea *corectă* dar nefamiliară, cu conceptele sale stranii şi dificile, de

exemplu teoria relativităţii, spaţiu-timpul cvadridimensional şi aşa mai departe? Sau să studiem mai întâi legea simplă a „masei constante“ care e doar aproximativă, dar nu implică idei atât de dificile? Prima este mai interesantă şi mai atrăgătoare, dar a doua e mai uşor de sesizat la început şi reprezintă un prim pas în înţelegerea celei de-a doua. Această problemă apare iarăşi şi iarăşi în tot studiul fizicii. La momente diferite va trebui s-o rezolvăm în moduri diferite, dar în fiecare etapă merită să învăţăm ce este cunoscut în prezent, cât de precis e, cum se potriveşte cu toate celelalte fapte şi cum s-ar putea schimba când vom afla mai mult.

Să trecem acum la schiţa sau planul general al înţelegerii noastre actuale a ştiinţei (în particular a fizicii, dar de asemenea şi a altor ştiinţe de la periferia ei). Astfel, când ne vom concentra mai târziu asupra unei anumite probleme, vom avea o idee despre întreg şi vom şti de ce problema în cauză e interesantă şi cum se încadrează ea în ansamblul structurii. Aşadar, care *este* imaginea noastră generală despre lume?

## Materia e alcătuită din atomi

Dacă, într-un cataclism, întreaga cunoaştere ştiinţifică ar fi distrusă şi ar fi transmisă generaţiilor următoare numai o frază, ce enunţ ar conţine cea mai multă informaţie în cât mai puţine cuvinte? Cred că aceasta este ipoteza *atomistă* (sau *faptul* atomic, ori cum vreţi să-i spuneţi) conform căreia *toate lucrurile sunt alcătuite din atomi — mici particule care se mişcă continuu, atrăgându-se una pe alta când sunt la mică distanţă, respingându-se când sunt înghesuite una într-alta.* Veţi vedea că în această unică frază există o cantitate *enormă* de informaţie despre lume, dacă folosim doar puţină imaginaţie şi gândire.

Pentru a ilustra puterea ideii atomiste, să presupunem că privim o picătură de apă cu diametrul de o jumătate de

centimetru. Dacă privim foarte de aproape nu vedem decât apă — apă omogenă și continuă. Să o mărim cu cel mai bun microscop optic disponibil, aproximativ de două mii de ori: atunci picătura de apă va avea diametrul de circa doisprezece metri, cam cât o cameră mai spațioasă. Dacă am privi de aproape, am vedea *încă* apă relativ uniformă — dar ici și colo ar apărea mici obiecte de forma unor mingi de rugbi înotând înainte și înapoi. Foarte interesant. Aceștia sunt paramecii. Ne-am putea opri la acest nivel, devenind atât de curioși în privința paramecilor, cu cilii fremătând și corpurile lor care se răsucesc, încât să nu mergem mai departe decât poate pentru a mări paramecii încă și mai mult ca să vedem înăuntrul lor. Acesta este desigur un subiect pentru biologie; dar trecem mai departe și privim și mai de aproape substanța însăși a apei, mărind-o iarăși de două mii de ori. Acum picătura de apă are circa 24 de kilometri diametru, iar dacă o privim foarte de aproape vedem un fel de forfotă, care nu mai are un aspect uniform — arată cam ca o mulțime de oameni la un joc de fotbal, văzuți de la distanță foarte mare. Pentru a vedea ce este cu această forfotă, o vom mări de alte două sute cincizeci de ori și vom vedea ceva asemănător cu ceea ce e arătat în figura 1.1. Aceasta e o imagine a apei mărită de un miliard de ori, dar idealizată în mai multe feluri, în primul rând, particulele sunt desenate simplificat, cu margini nete, ceea ce e inexact, în al doilea rând,

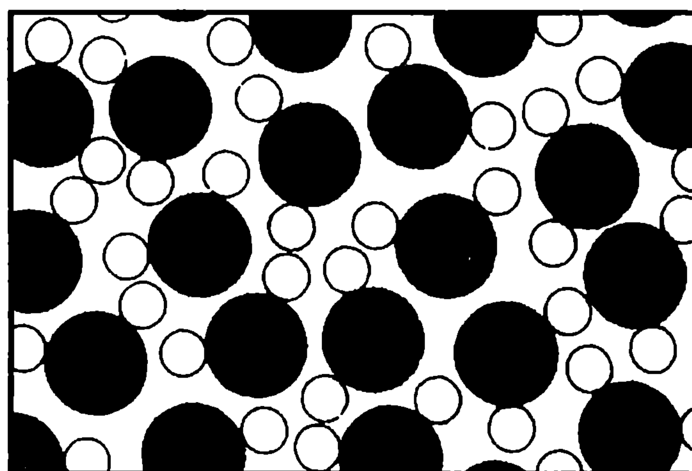


*Fig. 1.1.* Apă mărită de un miliard de ori

pentru simplitate ele sunt reprezentate schematic într-o aranjare bidimensională, dar, evident, mişcarea lor are loc în trei dimensiuni. Observaţi că există două feluri de cercuri — unele negre pentru a reprezenta atomii de oxigen, iar altele albe pentru atomii de hidrogen; fiecare oxigen are doi hidrogeni legaţi de el. (Fiecare grup de câte un oxigen cu cei doi hidrogeni ai săi se numeşte moleculă.) Imaginea este idealizată apoi şi prin faptul că particulele reale din natură se agită continuu, sar, se rotesc şi se învârt una în jurul celeilalte. Va trebui să vă reprezentaţi o imagine dinamică, nu una statică. Alt lucru care nu poate fi ilustrat într-un desen este faptul că particulele „sunt legate laolaltă" — că se atrag una pe alta: aceasta de aici e atrasă de cealaltă etc. Întregul sistem de particule este „legat laolaltă", aşa-zicând. Pe de altă parte, particulele nu pătrund una prin alta. Dacă încercăm să înghesuim două din ele prea aproape, ele se resping.

Atomii au raze de 1–2 × $10^{-8}$ cm. Lungimea de $10^{-8}$ cm se numeşte *angström* (un nume ca oricare altul), aşa că spunem că ei au raze de 1–2 angströmi (Å). Alt mod de a ţine minte mărimea lor e următorul: dacă un măr este mărit până la dimensiunea Pământului, atunci atomii din măr devin aproximativ de mărimea mărului iniţial.

Acum imaginaţi-vă această mare picătură de apă cu toate particulele ei în agitaţie legate laolaltă şi urmărindu-se una pe alta. Apa îşi păstrează volumul; ea nu se desface în părţi, din cauza atracţiei dintre molecule. Dacă o picătură se află pe o pantă, unde se poate mişca dintr-un loc într-altul, ea va curge, fără să dispară pur şi simplu — lucrurile nu se desfac în bucăţi, datorită atracţiei moleculare. Mişcarea de agitaţie este ceea ce noi ne reprezentăm drept *căldură*: când creşte temperatura, sporeşte agitaţia. Dacă încălzim apa, agitaţia creşte, spaţiul dintre atomi se măreşte, iar dacă încălzirea continuă vine momentul când atracţia dintre molecule

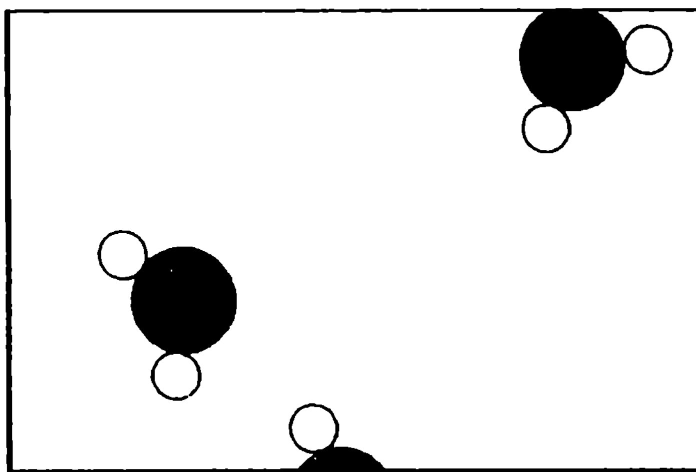


*Fig. 1.2.* Abur

nu mai este suficientă pentru a le ține laolaltă — ele se *împrăștie* și se separă una de alta. În acest fel producem abur din apă — crescând temperatura; particulele se îndepărtează din cauza agitației sporite.

În figura 1.2 avem o imagine a aburului. Această imagine e greșită într-o privință: la presiunea atmosferică obișnuită într-o cameră întreagă ar putea exista doar câteva molecule și, desigur, ar fi mai puțin de trei în această figură. Cele mai multe dreptunghiuri de această mărime nu ar conține nici o moleculă, dar în desen avem întâmplător două și jumătate sau trei (astfel încât ea să nu fie complet albă). Acum, în cazul aburului, vedem moleculele caracteristice mai clar decât în cazul apei. Pentru simplitate, moleculele sunt desenate astfel încât între liniile care unesc centrele atomilor există un unghi de 120°. De fapt unghiul este de 105-3', iar distanța dintre centrul unui atom de hidrogen și centrul unui atom de oxigen e de 0,957 Å, astfel încât cunoaștem această moleculă foarte bine.

Să vedem câteva din proprietățile aburului sau ale oricărui alt gaz. Moleculele, fiind separate una de alta, se vor izbi de pereți. Imaginați-vă o cameră cu un număr de mingi de tenis (o sută, de exemplu) sărind prin ea în toate direcțiile în necontenită mișcare. Când ele ciocnesc peretele, acesta este împins. (Desigur că trebuie să reușim să ținem peretele pe loc.) Aceasta înseamnă că gazul exercită o forță

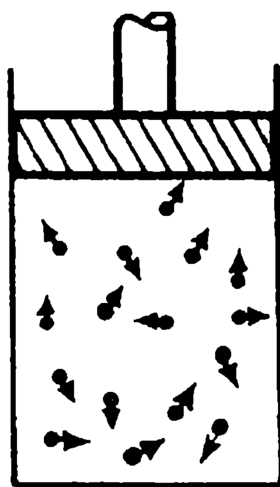


*Fig. 1.3.* Cilindru cu piston conținând un gaz

intermitentă asupra oricărei suprafețe, forță pe care simțurile noastre o resimt doar ca o *împingere medie* (noi înșine nefiind măriți de un miliard de ori). Pentru a limita un gaz trebuie să aplicăm o presiune. Figura 1.3 arată recipientul standard pentru păstrat gazele (folosit în toate manualele) — un cilindru cu piston. Nu contează ce formă au moleculele de apă, așa că, pentru simplitate, le vom desena ca pe niște mingi de tenis sau mici cerculețe. Aceste obiecte sunt în necontenită mișcare în toate direcțiile. Pistonul este lovit de atât de multe dintre ele, tot timpul, încât pentru a-l împiedica să fie încet-încet scos afară din recipient de această lovire continuă, va trebui să-l apăsăm în jos cu o anumită forță, pe care o numim *presiune* (în realitate, forța este presiunea înmulțită cu aria). Evident, forța e proporțională cu aria, căci dacă mărim aria dar menținem același număr de molecule pe centimetru cub, numărul de ciocniri cu pistonul crește în aceeași proporție în care a crescut aria.

Să punem acum de două ori mai multe molecule în acest recipient, dublând astfel densitatea, iar moleculele să aibă în medie aceeași viteză, adică temperatură. Atunci, cu o bună aproximație, numărul de ciocniri se va dubla și întrucât fiecare dintre ele va fi la fel de „energică“ ca și înainte, presiunea este proporțională cu densitatea. Dacă luăm în considerare adevărata natură a forțelor dintre atomi, ar trebui ca presiunea să descrească puțin datorită atracției dintre atomi și

să crească puțin din cauza volumului finit pe care-l ocupă aceștia. Totuși, într-o aproximație satisfăcătoare, dacă densitatea e suficient de joasă, astfel încât să nu existe prea mulți atomi, presiunea e proporțională cu densitatea.

Să observăm încă ceva: dacă mărim temperatura fără a modifica densitatea gazului, adică mărim viteza atomilor, ce se va întâmpla cu presiunea? Ei bine, atomii lovesc mai tare deoarece se mișcă mai repede și, totodată, lovesc mai des, așa că presiunea crește. Vedeți cât de simple sunt ideile teoriei atomice.

Să considerăm altă situație. Închipuiți-vă că pistonul se mișcă spre interior, astfel încât atomii sunt comprimați încet într-un spațiu mai mic. Ce se va întâmpla când un atom lovește pistonul în mișcare? Evident, el câștigă viteză din ciocnire. O puteți constata de exemplu făcând să ricoșeze o minge de ping-pong pe o paletă care se mișcă înainte și veți constata că mingea este întoarsă cu o viteză mai mare decât cea cu care s-a îndreptat spre paletă. (Exemplu particular: dacă un atom se întâmpla să stea pe loc, iar pistonul îl lovește, el se va pune cu siguranță în mișcare.) Așa că atomii sunt „mai fierbinți“ când se îndepărtează de piston decât erau înainte de a-l lovi. Deci toți atomii care sunt în vas vor fi câștigat viteză. Aceasta înseamnă că *atunci când comprimăm încet un gaz, temperatura gazului crește.* Astfel, la *compresie* lentă temperatura unui gaz va crește, iar la *destindere* lentă temperatura va *descrește.*

Să revenim acum la picătura noastră de apă și privim în altă direcție. Închipuiți-vă că agitația moleculelor din apă descrește continuu. Știm că există forțe de atracție între molecule, așa că de la un moment dat moleculele nu vor mai fi în stare să se agite atât de liber. Ce se va petrece la temperaturi foarte joase este indicat în figura 1.4: moleculele se imobilizează într-o nouă structură, care e *gheața.* Această diagramă schematică a gheții e greșită, pentru că e în două

dimensiuni, dar ea este corectă din punct de vedere calitativ. Interesant e faptul că în gheață *fiecare atom are un loc bine definit.* Puteți înțelege ușor că dacă, într-un mod oarecare, am menține toți atomii de la un capăt într-o anumită aranjare, cu fiecare atom într-un anumit loc, atunci din cauza structurii rigide a interconexiunilor, celălalt capăt, la kilometri depărtare (la scara noastră mărită), va avea o poziție bine determinată. Așa că, dacă am ține un ac de gheață de un capăt, celălalt capăt rezistă unei împingeri laterale, spre deosebire de cazul apei, în care structura este ruptă din cauza agitației mai mari a atomilor ce se mișcă dezordonat. Solidele diferă deci de lichide prin aceea că într-un solid atomii sunt aranjați într-un fel de rețea, numită *rețea cristalină.* Chiar pe distanțe mari poziția lor nu este întâmplătoare; poziția atomilor dintr-o parte a cristalului este determinată de aceea a altor atomi aflați la milioane de atomi distanță, în cealaltă parte a cristalului. Figura 1.4 reprezintă o aranjare imaginată a atomilor în gheață și cu toate că are multe caracteristici corecte, nu este însă aranjarea reală. Una din caracteristicile corecte este faptul că apare ceva din simetria hexagonală. Puteți vedea că, dacă rotim imaginea în jurul unei axe cu 120°, imaginea revine la ea însăși. Există într-adevăr o *simetrie* în gheață, care explică aspectul hexagonal al fulgilor de zăpadă. Din figura 1.4 putem vedea și de ce gheața se contractă când se topește. Structura cristalului

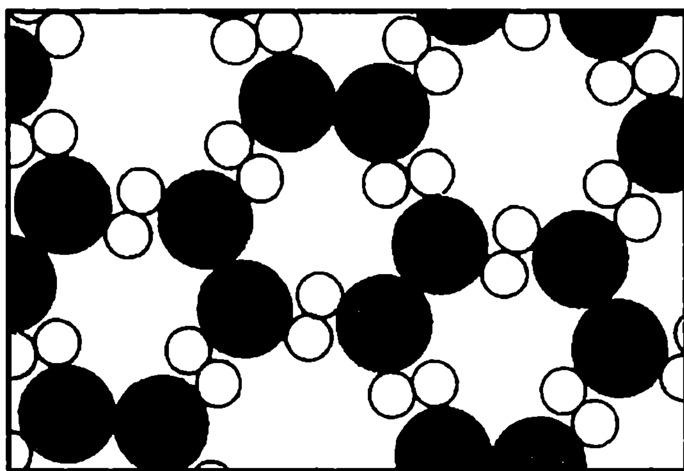


*Fig. 1.4.* Gheață

de gheață considerată aici are multe *găuri* în ea, ca și structura adevărată. Când organizarea se rupe, aceste găuri pot fi ocupate de molecule. Cele mai multe substanțe simple, cu excepția apei și a aliajului folosit la tipar, își *măresc volumul* prin topire, deoarece atomii sunt strâns îngrămădiți în cristalul solid, iar la topire au nevoie de mai mult loc pentru a se agita; o structură cu goluri însă se contractă, ca în cazul apei.

Cu toate că gheața are o formă cristalină „rigidă", temperatura ei se poate schimba — gheața conține căldură. Dacă vrem, îi putem schimba cantitatea de căldură. Ce este căldura în cazul gheții? Atomii nu stau pe loc. Ei se agită și vibrează. Astfel, chiar dacă există o ordine precizată în cristal — o structură bine definită —, toți atomii vibrează „pe loc". Pe măsură ce creștem temperatura, ei vibrează cu amplitudine din ce în ce mai mare, până când își părăsesc locul. Numim aceasta *topire.* Pe măsură ce scădem temperatura, vibrația descrește continuu până când, la zero absolut, rămâne o cantitate minimă de vibrație pe care o pot avea atomii, diferită de zero. Această cantitate minimă de mișcare nu este suficientă pentru a topi o substanță, cu o singură excepție: heliul. Heliul își micșorează doar mișcările atomice cât de mult poate, dar chiar la zero absolut există destulă mișcare pentru a-l împiedica să înghețe. Heliul, chiar la zero absolut, nu îngheață, în afară de cazul când presiunea e atât de mare încât atomii sunt striviți laolaltă. Dacă mărim presiunea îl *putem* face să se solidifice.

## PROCESE ATOMICE

Ne oprim aici cu descrierea solidelor, lichidelor și gazelor din punct de vedere atomic. Dar ipoteza atomică descrie și *procese,* așa că vom considera acum un număr de procese din perspectiva atomistă. Primul proces pe care-l

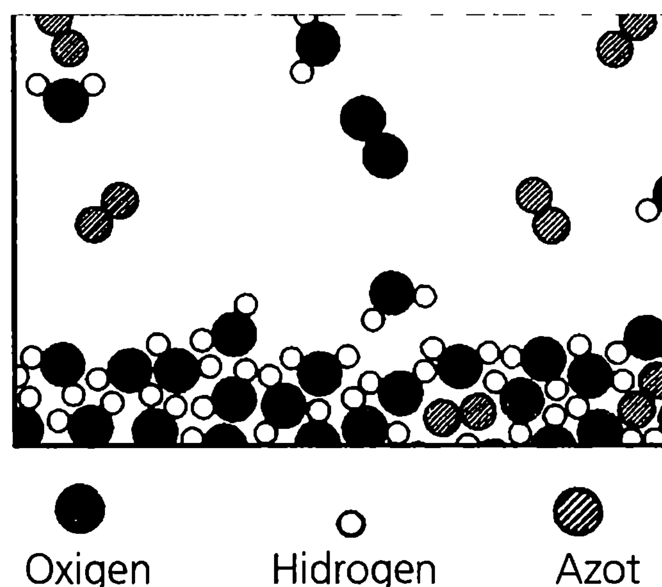



*Fig. 1.5.* Apă evaporându-se în aer

vom considera are loc la suprafaţa apei. Ce se petrece la suprafaţa apei? Vom face acum un desen mai complicat — şi mai realist — imaginându-ne că suprafaţa este mărginită de aer. Figura 1.5 prezintă această suprafaţă. Ca şi mai înainte, vedem moleculele de apă formând o masă de apă lichidă, dar acum vedem şi suprafaţa apei. Deasupra suprafeţei găsim o seamă de lucruri: mai întâi, există molecule de apă, ca în abur. Acestea formează *vaporii de apă,* care se găsesc întotdeauna deasupra apei lichide. (Există un echilibru între vapori şi apă, care va fi descris mai târziu.) În plus găsim alte molecule — când doi atomi de oxigen lipiţi laolaltă prin forţe interne formând o *moleculă de oxigen,* când doi atomi de azot de asemenea lipiţi laolaltă spre a forma o *moleculă de azot.* Aerul este format aproape în întregime din azot, oxigen, ceva vapori de apă şi cantităţi mai mici de dioxid de carbon, argon şi alte lucruri. Astfel, deasupra suprafeţei apei este aerul, un gaz, conţinând ceva vapori de apă. Acum, ce se întâmplă în această situaţie? Moleculele din apă se agită mereu. Din când în când, una de la suprafaţă se întâmplă să fie lovită puţin mai tare decât de obicei şi e zvârlită afară. E greu de văzut aceasta petrecându-se în desen, fiindcă el este o imagine *nemişcată.* Dar ne putem imagina că o moleculă din apropierea suprafeţei tocmai a fost lovită şi zboară afară, sau poate că alta a fost cea lovită şi pleacă.

Astfel, moleculă cu moleculă, apa dispare — se evaporă. Dar dacă *închidem* vasul deasupra, după un timp vom găsi un mare număr de molecule de apă printre moleculele de aer. Din când în când una dintre aceste molecule din vapori vine în jos către apă și se lipește din nou. Astfel, vedem că ceea ce arată ca un obiect neinteresant, lipsit de viață — un pahar de apă cu un capac, care stă acolo poate chiar de douăzeci de ani —, conține în realitate un fenomen dinamic, interesant, care se desfășoară permanent. Pentru ochii noștri, ochii noștri nerafinați, nimic nu se schimbă, dar dacă am putea vedea mărit de un miliard de ori am constata că situația se schimbă mereu: molecule părăsesc suprafața, molecule sosesc înapoi.

De ce *noi* nu vedem *nici o schimbare*? Fiindcă pleacă exact atâtea molecule câte vin înapoi! Una peste alta, „nu se întâmplă nimic". Dacă scoatem capacul vasului și suflăm la o parte aerul umed, înlocuindu-l cu aer uscat, numărul de molecule care pleacă este exact același ca și înainte, pentru că aceasta depinde de agitația din apă, dar numărul ce sosește înapoi este mult redus fiindcă există mult mai puține molecule deasupra apei. Așadar, sunt mai multe cele care pleacă decât cele care sosesc, iar apa se evaporă. Prin urmare, dacă vreți să evaporați apă, dați drumul la ventilator!

Încă ceva: care molecule pleacă? Când o moleculă pleacă, aceasta se datorează unei acumulări suplimentare, accidentale de energie, cu puțin mai multă decât cea obișnută, de care are nevoie molecula dacă ar fi să scape de atracțiile vecinilor săi. Deci, întrucât moleculele care pleacă au mai multă energie decât media, cele care rămân au o agitație medie mai mică decât avuseseră înainte. Așa încât lichidul se *răcește* treptat dacă se evaporă. Desigur, când o moleculă de vapori vine din aer în jos spre apă, apare o atracție mare, bruscă, atunci când ea se apropie de suprafața apei. Aceasta accelerează molecula care sosește și rezultă o generare de

căldură; când sosesc înapoi moleculele generează căldură. Evident, când nu există o evaporare netă, rezultatul e zero — apa nu își schimbă temperatura. Dacă suflăm în apă astfel încât să menținem o continuă preponderență în numărul moleculelor care se evaporă, apa se răcește. Deci, suflați în supă dacă vreți s-o răciți!

Desigur, trebuie să vă dați seama că procesele descrise sunt mai complicate decât am arătat. Nu numai că apa trece în aer, dar de asemenea, din când în când, una din moleculele de oxigen sau azot va intra și se va pierde în masa moleculelor de apă, croindu-și drum prin apă. Astfel, aerul se dizolvă în apă; moleculele de oxigen și azot își vor croi drum prin apă și apa va conține aer. Dacă scoatem brusc aerul din vas, molecule de aer vor pleca mai repede decât sosesc și procedând astfel vor produce bule. Asta e foarte rău pentru scafandri, după cum poate că știți.

Să trecem acum la alt proces. În figura 1.6 vedem, din perspectivă atomistă, un solid dizolvându-se în apă. Dacă punem un cristal de sare în apă, ce se va întâmpla? Sarea este un solid, un cristal, o aranjare organizată de „atomi de sare". Figura 1.7 este o ilustrare a structurii tridimensionale a sării obișnuite, clorura de sodiu. Riguros vorbind, cristalul nu e alcătuit din atomi, ci din ceea ce se cheamă *ioni.*

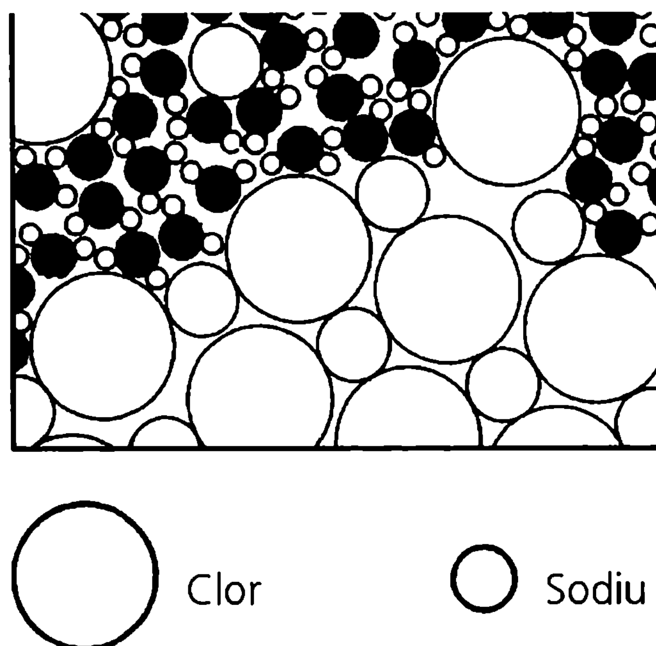
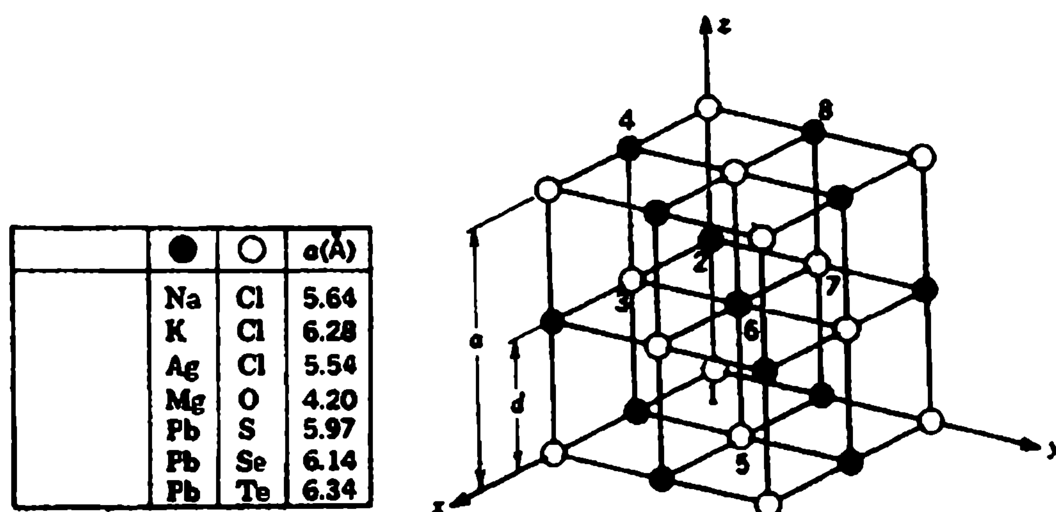



*Fig. 1.6.* Sare dizolvându-se în apă



| | ● | ○ | a(Å) |
|---|---|---|---|
| | Na | Cl | 5.64 |
| | K | Cl | 6.28 |
| | Ag | Cl | 5.54 |
| | Mg | O | 4.20 |
| | Pb | S | 5.97 |
| | Pb | Se | 6.14 |
| | Pb | Te | 6.34 |



Distanța până la vecinul cel mai apropiat $d = a/2$

*Fig. 1.7.* Structura cristalină a clorurii de sodiu

Un ion este un atom care fie are câțiva electroni suplimentari, fie și-a pierdut câțiva electroni. Într-un cristal de sare găsim ioni de clor (atomi de clor cu un electron suplimentar) și ioni de sodiu (atomi de sodiu cu un electron lipsă). În sarea solidă, ionii se leagă toți laolaltă prin atracție electrică, dar când îi punem în apă găsim, din cauza atracțiilor oxigenului negativ și hidrogenului pozitiv pentru ioni, că unii dintre ioni se agită liber. În figura 1.6 vedem un ion de clor devenind liber și alți atomi plutind în apă în formă de ioni. Acest desen a fost făcut cu oarecare grijă. Observați, de exemplu, că este mai probabil ca părțile conținând hidrogen ale moleculelor de apă să se afle lângă ionul de clor, în timp ce lângă ionul de sodiu e mai probabil să găsim capătul cu oxigen, fiindcă sodiul este pozitiv, capătul cu oxigen al apei e negativ și se atrag electric. Putem spune din acest desen dacă sarea se *dizolvă* în apă sau dacă *cristalizează* din apă? Desigur că *nu putem* spune, fiindcă în timp ce unii atomi părăsesc cristalul, alți atomi i se realătură. Procesul este *dinamic*, exact ca în cazul evaporării, și el depinde de existența a mai multă sau mai puțină sare în apă decât cantitatea necesară pentru echilibru. Prin echilibru înțelegem acea situație în care atomii pleacă într-o măsură egală cu măsura în care se întorc. Dacă aproape că nu

există sare în apă, pleacă mai mulți atomi decât se întorc, iar sarea se dizolvă. Dacă, pe de altă parte, există prea mulți „atomi de sare", mai mulți se întorc decât pleacă și sarea cristalizează.

În treacăt fie spus, conceptul de *moleculă* a unei substanțe este doar aproximativ și există numai pentru o anumită clasă de substanțe. E limpede în cazul apei că cei trei atomi sunt într-adevăr legați laolaltă. Nu e la fel de limpede în cazul clorurii de sodiu solide. Există doar o aranjare a ionilor de sodiu și clor într-o rețea cubică. Nu există vreun mod natural de a-i grupa în „molecule de sare".

Întorcându-ne la discuția noastră asupra dizolvării și precipitării, dacă mărim temperatura soluției de sare, atunci ritmul în care atomii sunt scoși crește, iar la fel și ritmul în care atomii sunt aduși înapoi. Se vădește însă a fi foarte dificil, în general, să se prezică în ce sens se va desfășura fenomenul, dacă se va dizolva mai mult sau mai puțin din solid. Când temperatura crește, cele mai multe substanțe se dizolvă mai mult, dar sunt și unele care se dizolvă mai puțin.

## Reacții chimice

În toate procesele descrise până acum, atomii și ionii nu și-au schimbat partenerii, dar există desigur împrejurări în care atomii își schimbă combinațiile, formând noi molecule. Acest fapt este ilustrat în figura 1.8. Un proces în care intervine rearanjarea partenerilor atomici se numește *reacție chimică.* Celelalte procese descrise până acum se numesc procese fizice, dar nu există o distincție netă între cele două. (Natura nu se sinchisește cum le numim, ea continuă doar să le producă.) Această figură se presupune că reprezintă carbonul arzând în oxigen, în cazul oxigenului, *doi* atomi de oxigen se leagă laolaltă foarte puternic. (De ce nu se leagă

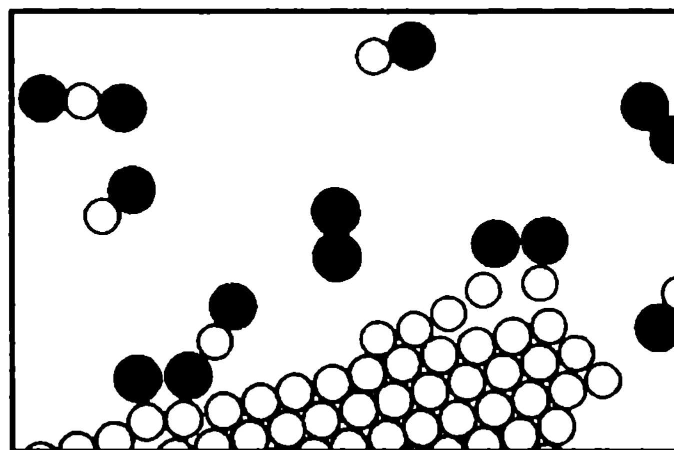


*Fig. 1.8.* Carbon arzând în oxigen

laolaltă trei sau chiar patru? Aceasta este una dintre caracteristicile foarte specifice ale unor asemenea procese atomice. Atomii sunt foarte pretențioși; le plac anumiți parteneri, anumite direcții particulare și așa mai departe. Este sarcina fizicii să analizeze de ce fiecare atom dorește ceea ce dorește, în orice caz, doi atomi de oxigen formează, saturați și fericiți, o moleculă.)

Să presupunem că atomii de carbon sunt într-un cristal solid (care ar putea fi grafit sau diamant*). Acum, de exemplu, una din moleculele de oxigen poate veni către carbon și fiecare atom de oxigen poate culege un atom de carbon și pleca într-o nouă combinație — „carbon-oxigen“ — care este o moleculă a gazului numit monoxid de carbon. I s-a dat numele chimic de CO. E foarte simplu: literele „CO“ sunt practic o imagine a acestei molecule. Dar carbonul atrage oxigenul mult mai mult decât oxigenul atrage oxigenul sau carbonul atrage carbonul. Deci, în acest proces oxigenul poate sosi doar cu o mică energie, însă oxigenul și carbonul se vor arunca unul asupra altuia cu o nemaipomenită înverșunare și orice se află în apropierea lor va câștiga energie. Este astfel generată o mare cantitate de energie de mișcare, energie cinetică. Evident, aceasta e *arderea;* obținem *căldură* din combinarea oxigenului și carbonului. Căldura

* Se *poate* arde diamant în aer. (*N. a.*)

apare de obicei sub forma mișcării moleculare a gazului fierbinte, dar în anumite împrejurări ea poate fi atât de mare încât generează *lumina*. Așa se obțin *flăcările*.

Însă monoxidul de carbon nu este tocmai satisfăcut. E posibil ca el să-și atașeze un alt oxigen, astfel încât am putea avea o reacție mult mai complicată, în care oxigenul se combină cu carbonul și, în același timp, se întâmplă să aibă loc o ciocnire cu o moleculă de monoxid de carbon. Un atom de oxigen s-ar putea atașa la CO, iar în final să formeze o moleculă compusă dintr-un carbon și doi oxigeni, care este desemnată prin $CO_2$ și numită dioxid de carbon. Dacă ardem carbonul cu foarte puțin oxigen, într-o reacție foarte rapidă (de exemplu într-un motor de automobil, unde explozia este atât de rapidă încât nu e timp ca ea să producă dioxid de carbon), se formează o cantitate considerabilă de monoxid de carbon. În multe astfel de rearanjări se eliberează o mare cantitate de energie dând naștere la explozii, flăcări etc., în funcție de reacțiile respective. Chimiștii au studiat aceste aranjări ale atomilor și au găsit că fiecare substanță reprezintă un tip de *aranjare a atomilor*.

Pentru a ilustra această idee, să considerăm un alt exemplu. Dacă mergem printr-un câmp de violete, știm ce este „acel miros“. Este un anumit fel de *moleculă*, sau aranjare a atomilor, care și-a croit drum în nasul nostru. Mai întâi, *cum* și-a croit drum înăuntru ? Asta e foarte simplu. Dacă mirosul este un anumit fel de moleculă din aer, aceasta, agitându-se și fiind izbită în toate părțile, și-a putut croi în mod *accidental* drum în nas. Desigur că ea nu are vreo dorință specială de a ajunge în nasul nostru. Ea este doar o parte neajutorată a unei mulțimi de molecule ce se îmbrâncesc și, în hoinărelile-i fără țel, acestei bucăți particulare de materie i se întâmplă să ajungă în nasul nostru.

Chimiștii pot lua anumite molecule, cum este parfumul de violete, pentru a le analiza și a ne spune care-i *aranjarea exactă* a atomilor în spațiu. Știm că molecula de dioxid de

carbon este dreaptă și simetrică: O—C—O. (Asta se poate determina ușor și prin metode fizice.) Dar chiar pentru aranjările de atomi mult mai complicate care există în chimie, se poate, printr-un lung și remarcabil proces de muncă detectivistică, să se găsească dispunerea atomilor. Figura 1.9 este o imagine a aerului în vecinătatea unei violete; din nou găsim azot și oxigen în aer, precum și vapori de apă. (De ce există vapori de apă? Fiindcă violeta e *umedă*. Toate plantele transpiră.) Vedem însă și un „monstru“ compus din atomi de carbon, atomi de hidrogen și atomi de oxigen, care au ales o anumită structură particulară pentru a se aranja. Este o aranjare mult mai complicată decât cea a dioxidului de carbon; de fapt, este o aranjare extrem de complicată. Din păcate, nu putem înfățișa tot ce ne poate spune chimia despre ea, fiindcă aranjarea precisă a tuturor atomilor este de fapt cunoscută în trei dimensiuni, pe când desenul nostru e doar în două dimensiuni. Cei șase carboni, care formează un inel, nu formează un inel plat, ci un fel de inel „încrețit“. Toate unghiurile și distanțele sunt cunoscute. Astfel, o *formulă* chimică este pur și simplu o imagine a unei astfel de molecule. Când un chimist scrie așa ceva pe tablă, el încearcă să „deseneze“‘, grosso modo, în două dimensiuni. De exemplu, vedem un „inel“ de șase carboni având un „lanț“ de carboni atârnat de el, cu un oxigen, al doilea de la capăt, trei hidrogeni legați aici, doi carboni și trei hidrogeni legându-se dincoace etc.

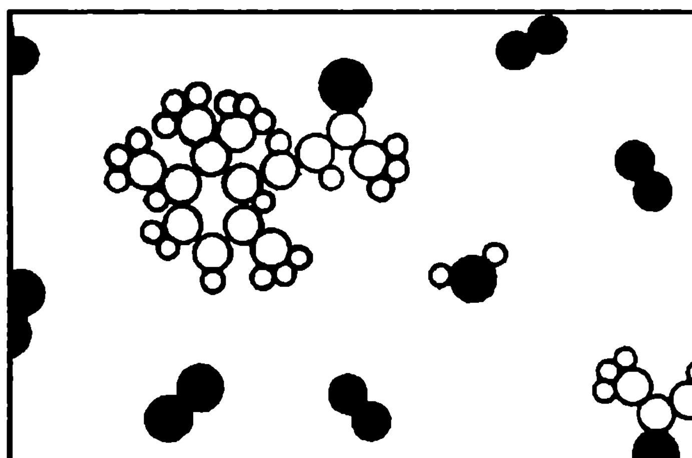


*Fig. 1.9.* Parfumul violetelor

Cum află chimistul care este aranjarea? El amestecă laolaltă sticle pline cu substanţe şi dacă se colorează în roşu asta îi spune că are un hidrogen şi doi carboni legaţi aici; dacă, pe de altă parte, apare albastru, lucrurile nu stau deloc aşa. Este una din cele mai fantastice munci de detectiv care au fost făcute vreodată — chimia organică. Pentru a descoperi aranjarea atomilor în aceste reţele formidabil de complicate, chimistul priveşte la ceea ce se întâmplă când amestecă două substanţe diferite laolaltă. Fizicianului nu i-a venit niciodată să creadă că chimistul ştie cu adevărat despre ce vorbeşte când descrie aranjarea atomilor. De circa douăzeci de ani a fost însă posibil, în unele cazuri, să se privească la asemenea molecule (nu chiar atât de complicate ca cele ale parfumului de violete, dar la unele care conţin părţi din acestea) printr-o metodă fizică şi a fost posibil să se localizeze fiecare atom, nu privind la culori, ci *măsurând poziţia lui.* Şi, ce să vezi, chimiştii au aproape întotdeauna dreptate!

Se vădeşte, de fapt, că în parfumul de violete există trei molecule puţin deosebite, care diferă doar prin aranjarea atomilor de hidrogen.

Una din problemele chimiei este de a denumi o substanţă astfel încât să ştim ce este ea. Găsiţi un nume pentru structura din figura 1.10! Nu numai că numele trebuie să ne indice forma, dar el trebuie de asemenea să ne spună că aici

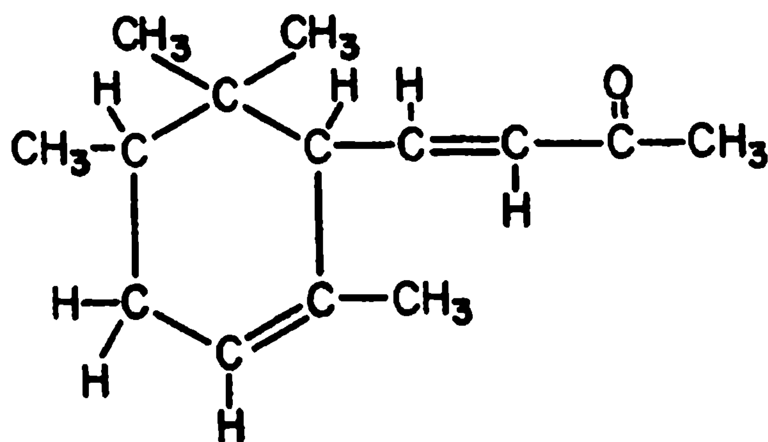



*Fig. 1.10.* O formulă chimică (substanţa reprezentată este α-irona)

e un atom de oxigen, dincolo unul de hidrogen — exact ce fel și unde se află fiecare atom. Astfel, putem aprecia de ce denumirile chimice trebuie să fie complexe pentru a fi complete. Numele substanței din figura 1.10 în cea mai completă formă care vă va spune structura sa este 4-(2, 2, 3, 6 tetrametil-5-ciclohexanil)-3-buten-2-onă, și asta vă spune și care e aranjarea. Putem aprecia dificultățile pe care le au chimiștii și înțelege de asemenea de ce există nume atât de lungi. Nu fiindcă ar vrea să fie obscuri, dar se află în fața unei probleme extrem de dificile atunci când încearcă să descrie moleculele în cuvinte!

De unde *știm* că există atomi? Printr-una din metodele menționate anterior; facem *ipoteza* că există atomi, iar unul după altul rezultatele apar în modul în care le prezicem, așa cum ar trebui dacă lucrurile sunt alcătuite din atomi. Există de asemenea dovezi ceva mai directe, dintre care un bun exemplu e următorul: atomii sunt atât de mici încât nu îi puteți vedea cu un microscop optic — de fapt nici chiar cu un microscop *electronic.* (Cu un microscop optic puteți vedea numai lucruri care sunt mult mai mari.) Or, dacă atomii sunt mereu în mișcare, să zicem în apă, și punem o bilă, indiferent din ce material, în apă, o bilă mult mai mare decât atomii, bila se va agita — cam ca într-un joc de „push-ball“, unde o minge foarte mare e împinsă de o mulțime de oameni. Oamenii împing în direcții diferite, iar mingea se mișcă pe teren într-un mod neregulat. Astfel, în același mod, „bila cea mare“ se va mișca din cauza inegalităților ciocnirilor dintr-o parte și din alta, de la un moment la următorul. Așadar, dacă privim la niște particule minuscule din apă (coloizi) printr-un microscop excelent, vedem o forfotă permanentă a particulelor, care e rezultatul bombardamentului atomilor. Această forfotă se numește *mișcare browniană.*

Putem găsi alte mărturii despre atomi în structura cristalelor. În multe cazuri, structurile deduse prin analize de raze X se potrivesc în „formele“ lor spațiale cu formele pe care le prezintă cristalele în realitate, așa cum apar ele în natură. Unghiurile dintre diversele „fețe“ ale unui cristal se potrivesc, până la secunde de arc, cu unghiurile deduse pe baza presupunerii că un cristal este alcătuit din multe „straturi“ de atomi.

*Totul e alcătuit din atomi.* Aceasta e ipoteza-cheie. Cea mai importantă ipoteză din întreaga biologie, de exemplu, este că *tot ce fac animalele se datorează atomilor.* Cu alte cuvinte, *nu există nimic făcut de ființele vii care să nu poată fi înțeles din punctul de vedere conform căruia ele sunt constituite din atomi acționând în conformitate cu legile fizicii.* Aceasta nu s-a știut de la început: a fost nevoie de muncă experimentală și teoretică pentru a se sugera această ipoteză, dar acum ea este acceptată și e cea mai utilă teorie generatoare de noi idei din domeniul biologiei.

Dacă o bucată de oțel sau o bucată de sare, constând din atomi aflați unul alături de celălalt, pot avea proprietăți atât de interesante; dacă apa — care nu e decât aceste mici particele înșirate, kilometru după kilometru pe întreg pământul — poate forma valuri și spumă, poate face zgomote puternice și figuri ciudate când curge pe ciment; dacă toate acestea, toată viața unui șuvoi de apă nu e decât o îngrămădire de atomi, *ce ar mai fi cu putință?* Dacă, în loc de a aranja atomii într-o structură anumită, iarăși și iarăși repetată, tot mai departe, sau chiar de a forma mici bulgări de o complexitate precum cea a parfumului de violete, facem un aranjament *mereu diferit* de la un loc la altul, cu diferite feluri de atomi aranjați în moduri multiple, care se schimbă continuu fără să se repete — cu cât ar fi mai minunat comportamentul acelui lucru? E oare cu putință ca acest „lucru“ care se plimbă încoace și încolo în fața voastră și

vă vorbește să fie o mare îngrămădire de asemenea atomi, într-un aranjament complex, astfel încât pura sa complexitate să descumpănească imaginația în privința a ceea ce e el în stare să facă ? Când spunem că suntem o îngrămădire de atomi, nu înțelegem că suntem *pur și simplu* doar atât, căci o îngrămădire de atomi care nu se repetă poate avea foarte bine posibilitățile ce vă apar când vă priviți în oglindă.

# 2
# Concepțiile de bază ale fizicii

## Introducere

În acest capitol vom examina cele mai importante idei pe care le avem asupra fizicii, descriind natura lucrurilor așa cum o vedem în prezent. Nu vom discuta despre modul în care am aflat că toate aceste idei sunt adevărate; veți vedea aceste detalii la timpul potrivit.

Lucrurile de care ne interesăm în știință apar în nenumărate forme și cu o mulțime de atribute. De exemplu, dacă stăm pe mal și privim marea, vedem apa, valurile spărgându-se, spuma, mișcarea apei, percepem sunetul, aerul, vântul și norii, soarele și cerul albastru, totul scăldat în lumină; se află acolo nisip și se află stânci de diverse durități și vârste, culori și structuri. Se află animale și alge marine, foamete, boală și observatorul de pe plajă; poate că există chiar fericire și gândire. Orice alt colț din natură are o bogăție asemănătoare de lucruri și întrepătrunderi. Este întotdeauna la fel de complicat, oriunde s-ar găsi. Curiozitatea cere să punem întrebări, să încercăm să grupăm lucrurile laolaltă, să încercăm să înțelegem această multitudine de aspecte ca rezultând poate din acțiunea unui număr relativ mic de lucruri și forțe elementare, care se pot manifesta într-o varietate infinită de combinații.

De exemplu: este nisipul altfel decât stâncile? Adică, nu este oare nisipul altceva decât un mare număr de pietre minuscule? Este Luna o stâncă mare? Dacă înțelegem stâncile, vom înțelege de asemenea nisipul și Luna? Este vântul o mișcare a aerului analogă cu mișcarea apei din mare? Ce trăsături comune au diferitele mișcări? Ce este comun diferitelor tipuri de sunet? Câte culori diferite există? Și așa mai departe. În acest mod încercăm treptat să analizăm toate lucrurile, să le grupăm laolaltă pe cele care la prima vedere par diferite, în speranța că vom fi în stare să *reducem* numărul de lucruri *diferite*, iar astfel să le înțelegem mai bine.

Acum câteva sute de ani a fost inventată o metodă de a găsi răspunsuri parțiale la asemenea întrebări. *Observația*, *rațiunea* și *experimentul* formează ceea ce numim *metoda științifică*. Va trebui să ne limităm la o descriere sumară a ideilor fundamentale care s-au născut prin aplicarea metodei științifice, idei numite câteodată și *fizică fundamentală*.

Ce vrem să spunem prin „a înțelege" ceva? Ne putem imagina că această rețea complicată de lucruri în mișcare ce constituie „lumea" e asemănătoare cu un mare joc de șah jucat de zei, iar noi suntem observatori ai jocului. Nu știm care sunt regulile jocului; tot ce ni se permite să facem este să *urmărim* jocul. Desigur, dacă îl vom urmări destul de mult timp, putem în cele din urmă pricepe câteva dintre reguli. *Regulile jocului* sunt ceea ce înțelegem prin *fizică fundamentală*. Chiar dacă am cunoaște fiecare regulă, s-ar putea totuși să nu fim în stare să înțelegem de ce în decursul jocului se face o anumită mutare, pur și simplu fiindcă ea este prea complicată, iar mințile noastre sunt limitate. Dacă jucați șah, trebuie să știți că e ușor de învățat toate regulile și totuși este adesea foarte greu de selectat cea mai bună mutare sau de înțeles de ce un jucător joacă într-un anumit fel. Așa se întâmplă și în natură, doar că e mult mai complicat. Poate însă că vom fi în stare cel puțin să descoperim toate

regulile. Deocamdată nu le cunoaștem pe toate. (Din când în când se petrece ceva asemănător cu rocada, ceva ce încă nu am reușit să înțelegem.) Lăsând la o parte faptul că nu cunoaștem încă toate regulile, ceea ce putem într-adevăr explica prin aceste reguli este foarte limitat, fiindcă aproape toate situațiile sunt atât de complicate, încât practic nu putem să urmărim desfășurarea jocului doar aplicând regulile, cu atât mai puțin să prevedem ce se va întâmpla pe urmă. Trebuie deci să ne limităm la problema fundamentală a regulilor jocului. Dacă cunoaștem regulile, considerăm că „înțelegem" lumea.

Cum putem spune dacă regulile pe care le „ghicim" sunt într-adevăr corecte, de vreme ce nu putem analiza prea bine jocul? Există, în mare vorbind, trei căi. Mai întâi, pot exista situații în care natura să fie simplă (sau noi să aranjăm ca ea să ne apară astfel) și să aibă atât de puține părți încât să putem verifica cum funcționează regulile noastre precizând exact ce se va petrece. (Într-un colț al tablei de șah se poate să fi rămas doar câteva piese de joc, iar această situație s-o putem înțelege exact.)

O a doua cale potrivită pentru a verifica regulile este de a deduce din ele altele mai generale. De exemplu, regula de mutare a unui nebun pe o tablă de șah este că el se mișcă numai pe diagonală. Se poate deduce, indiferent câte mutări au fost făcute, că un anumit nebun va fi totdeauna pe un pătrețel alb. Astfel, fără a fi în stare să urmărim detaliile, putem verifica întotdeauna ideea noastră asupra mișcării nebunului cercetând dacă el se află mereu pe un pătrățel alb. Situația se va menține într-adevăr așa multă vreme, până când dintr-odată îl găsim pe un pătrățel *negru* (ceea ce s-a petrecut este că între timp el a fost luat, un pion a ajuns pe ultima linie și a devenit nebun pe un pătrățel negru). Așa se întâmplă și în fizică. Multă vreme vom avea o regulă care funcționează în general excelent, chiar dacă nu putem urmări

detaliile, iar apoi la un anumit moment putem descoperi o *nouă regulă.* Din punctul de vedere al fizicii fundamentale, cele mai interesante fenomene sunt desigur cele din locurile unde regulile nu funcţionează — nu cele din locurile unde ele funcţionează! Acesta este modul în care descoperim noi reguli.

A treia cale de a spune dacă ideile noastre sunt corecte este cam grosolană, dar e probabil cea mai puternică dintre toate: *aproximaţia* grosieră. Deşi nu suntem în stare să spunem de ce Alehin mută o *anume piesă,* poate că putem înţelege *aproximativ* că el îşi adună piesele în jurul regelui pentru a-l apăra cumva, fiindcă aceasta e acţiunea logică în împrejurările date. În acelaşi mod putem adesea înţelege cumva natura, fără a fi în stare să înţelegem ce face *fiecare mică părticică a ei.*

La început, fenomenele naturii au fost împărţite în mod aproximativ în diferite categorii, cum ar fi căldura, electricitatea, mecanica, magnetismul, proprietăţile substanţelor, fenomenele chimice, lumina sau optica, razele X, fizica nucleară, gravitaţia, fenomenele mezonice etc. Totuşi, scopul este de a vedea *întreaga natură* ca aspecte diferite ale *unui singur ansamblu* de fenomene. Aceasta este problema în fizica fundamentală teoretică astăzi — *de a găsi legile din spatele experimentelor*; *de a unifica aceste categorii de fenomene.* Din punct de vedere istoric, am fost totdeauna în stare să le unificăm, dar pe măsură ce timpul trece se găsesc lucruri noi. Procesul de unificare mergea foarte bine, până când dintr-odată au fost descoperite razele X. Apoi s-a continuat cu unificarea până când au fost descoperiţi mezonii. Aşadar, în orice stadiu al jocului, situaţia se prezintă cam încâlcită. Foarte multe lucruri sunt puse în ordine, dar rămân mereu o mulţime de sârme şi fire atârnând în toate direcţiile. Aşa se prezintă astăzi situaţia pe care vom încerca s-o descriem.

Iată câteva exemple istorice de unificare. Mai întâi, să considerăm *căldura* şi *mecanica.* Când atomii sunt în mişcare,

cu cât se mișcă mai mult, cu atât mai multă căldură conține sistemul, iar astfel *căldura și toate efectele temperaturii pot fi reprezentate prin legile mecanicii.* Altă unificare extraordinară a fost descoperirea relației dintre electricitate, magnetism și lumină, care s-au dovedit a fi diferite aspecte ale aceluiași lucru numit astăzi *câmp electromagnetic.* Altă unificare e cea a fenomenelor chimice, a diverselor proprietăți ale diferitelor substanțe, cu comportarea particulelor atomice, ceea ce a dat naștere la *chimia cuantică.*

Se pune desigur întrebarea: va fi cu putință să se unifice *totul* și să se descopere pur și simplu că această lume reprezintă diferite aspecte ale *unui singur* lucru? Nimeni nu știe. Tot ce știm e că, pe măsură ce înaintăm, constatăm că putem unifica părți, iar uneori găsim piese care nu se potrivesc și continuăm să încercăm să asamblăm puzzle-ul. Nu știm dacă puzzle-ul are un număr finit de piese și nici dacă are vreo limită. N-o vom afla până când nu vom completa figura, dacă aceasta se va întâmpla vreodată. În cele ce urmează vrem să vedem amploarea acestui proces de unificare și unde s-a ajuns în prezent în înțelegerea fenomenelor fundamentale prin intermediul unui ansamblu cât mai restrâns de principii. Simplu spus, *din ce sunt alcătuite lucrurile și cât de puține elemente există*?

## FIZICA ÎNAINTE DE 1920

E destul de greu să începem cu situația actuală a fizicii, așa încât trebuie mai întâi să vedem cum arătau lucrurile pe la 1920, iar apoi să extragem câteva concluzii din această imagine. Înainte de 1920, imaginea noastră despre lume arăta cam în felul următor: „scena“ pe care se desfășoară universul este *spațiul* geometric tridimensional, așa cum a fost descris de Euclid, iar lucrurile evoluează într-un mediu numit

*timp.* Elementele de pe scenă sunt *particulele,* de exemplu atomii, care au anumite *proprietăți.* Mai întâi, proprietatea de inerție: dacă o particulă se mișcă la un moment dat, ea va continua să se deplaseze în aceeași direcție, în afară de cazul când asupra ei acționează *forțe.* Al doilea element sunt deci *forțele,* despre care se credea pe atunci că sunt de două tipuri. Mai întâi, un fel de forță de interacție extrem de complicată, care menține diverșii atomi în diferite combinații și determină, de exemplu, dacă sarea se va dizolva mai repede sau mai încet când creștem temperatura. Celălalt tip de forță care se cunoștea era o forță cu rază mare de acțiune — o atracție continuă și uniformă — care variază invers proporțional cu pătratul distanței, numită *gravitație.* Această lege era cunoscută și era foarte simplă. *De ce* continuă să se miște lucrurile după ce au fost puse în mișcare, sau *de ce* există o lege a gravitației, acestea erau desigur necunoscute.

Ceea ce ne interesează în cele ce urmează este o descriere a naturii. Din această perspectivă, un gaz, și de fapt *întreaga* materie, este constituit dintr-o mulțime de particule în mișcare. Astfel, multe din lucrurile pe care le vedem în timp ce stăm pe malul mării pot fi imediat corelate. Mai întâi presiunea: aceasta provine din ciocnirile atomilor cu obstacolele ce le stau în cale; deplasarea atomilor, dacă ei se mișcă în medie într-o direcție, formează vântul; mișcările lor *dezordonate* în interiorul corpurilor reprezintă *căldura.* Dacă s-au adunat prea multe particule într-un loc, apare un exces de densitate, care dă naștere undelor de compresiune; acesta este *sunetul.* E o realizare excepțională să poți înțelege atât de multe lucruri. Unele dintre ele au fost descrise în capitolul precedent.

Câte *feluri* de particule există? La vremea aceea se considera că erau 92: 92 de feluri diferite de atomi au fost descoperite în cele din urmă. Ei aveau nume diferite, asociate cu proprietățile lor chimice.

Următoarea latură a problemei era: *care sunt forțele cu rază scurtă de acțiune* ? De ce atrage carbonul un oxigen sau poate doi oxigeni, dar nu trei oxigeni ? Care e mecanismul interacției dintre atomi ? Joacă vreun rol gravitația ? Răspunsul este nu. Gravitația e mult prea slabă. Imaginați-vă însă o forță analogă gravitației, variind invers proporțional cu pătratul distanței, dar mult, mult mai puternică și în plus având o trăsătură distinctă. În gravitație există numai atracție, dar acum imaginați-vă că există *două feluri* de „corpuri" și că această nouă forță (care e bineînțeles forța electrică) are proprietatea conform căreia corpurile de același fel *se resping*, iar cele diferite *se atrag*. Acel „ceva" care susține această interacție puternică se numește *sarcină*.

Prin urmare, ce imagine obținem ? Închipuiți-vă că avem două sarcini contrare, care se atrag una pe alta, una plus și alta minus, și că ele se alipesc foarte strâns laolaltă. Închipuiți-vă că avem o altă sarcină la o anumită distanță. Va resimți ea vreo atracție ? Ea nu va resimți *practic nici una*, fiindcă dacă primele sunt egale în mărime, atracția pentru una și respingerea pentru cealaltă se anulează. Așadar, forța la o distanță apreciabilă e foarte mică. Pe de altă parte, dacă ajungem *foarte aproape* cu sarcina suplimentară, apare o *atracție*, fiindcă respingerea celor de același semn și atracția celor de semn contrar vor tinde să apropie una de alta sarcinile de semn contrar și să le îndepărteze pe cele de același semn. Astfel, se ajunge în situația în care respingerea va fi *mai mică* decât atracția. Acesta este motivul pentru care atomii, care sunt alcătuiți din sarcini electrice plus și minus, suferă foarte puțin influența forței când sunt separați printr-o distanță mare (abstracție făcând de gravitație). Când se apropie, fenomenul se petrece ca și când ei ar privi unul înăuntrul altuia și își rearanjează astfel sarcinile, rezultatul fiind o interacție foarte puternică. Interacția dintre atomi este de natură *electrică*. Întrucât forța de atracție electrică este atât de mare,

toate sarcinile se vor aduna în mod normal laolaltă cât mai strâns cu putință. Toate lucrurile, chiar noi înșine, sunt alcătuite din părți fin granulate, încărcate cu plus și minus, interacționând extrem de puternic, toate perfect echilibrate. Din când în când, accidental, putem îndepărta prin frecare câteva minusuri sau câteva plusuri (de obicei e mai ușor să îndepărtăm minusuri), iar în acest caz apare o forță electrică *neechilibrată.* Putem atunci vedea efectele atracției electrice.

Pentru a înțelege cu cât este mai puternică electricitatea decât gravitația, să considerăm două grăunțe de nisip, de un milimetru diametru, aflate la treizeci de metri distanță. Dacă toate sarcinile s-ar atrage, în loc ca sarcinile de semn contrar să se respingă, așa încât să nu se mai producă anularea, ce forță ar apărea aici ? Între cele două grăunțe ar exista o forță de *trei milioane de tone* ! După cum vedeți, este necesar un foarte, *foarte* mic exces sau deficit în numărul de sarcini pozitive sau negative pentru a produce efecte electrice apreciabile. Motivul pentru care nu puteți vedea diferența dintre un obiect încărcat și altul neîncărcat electric este faptul că obiectele în cauză au atât de puține particule încărcate în exces sau în deficit, încât acestea nu produc vreo diferență în greutatea sau mărimea obiectelor.

Cu această imagine, atomii erau mai ușor de înțeles. Ei erau concepuți ca având un „nucleu“ în centru, încărcat electric pozitiv și foarte masiv, înconjurat de un anumit număr de „electroni“, care sunt foarte ușori și încărcați negativi. Facem acum un salt în povestea noastră, remarcând că în nucleul însuși se află două feluri de particule, protoni și neutroni, aproape de aceeași masă, relativ foarte mare. Protonii sunt încărcați electric și neutronii sunt neutri. Dacă avem un atom cu șase protoni înăuntrul nucleului său, care este înconjurat de șase electroni (particulele negative din lumea obișnuită a materiei sunt toate electroni; aceștia sunt foarte ușori în comparație cu protonii și neutronii din nu-

clee), el va fi atomul numărul șase din tabloul periodic al elementelor și este numit carbon. Atomul numărul opt se numește oxigen etc., fiindcă proprietățile chimice depind de electronii din *exterior* și, de fapt, numai de câți electroni există. Astfel, proprietățile *chimice* ale unei substanțe depind de un singur număr, numărul de electroni. (Întreaga listă de elemente a chimiștilor s-ar fi putut reduce de fapt la 1, 2, 3, 4, 5 etc. În loc de a spune „carbon“, am putea spune „elementul șase“, înțelegând șase electroni, dar, desigur, când au fost descoperite elementele nu se știa că ele puteau fi numerotate în acest mod, iar apoi aceasta ar face ca totul să arate destul de complicat. E mai bine să avem nume și simboluri pentru aceste elemente decât să le numim prin numere.)

Și mai multe lucruri s-au descoperit despre forța electrică. Interpretarea naturală a interacției electrice este că două obiecte se atrag pur și simplu unul pe altul: plus cu minus. S-a dovedit însă că acesta este un mod nepotrivit de a reprezenta situația. O reprezentare mai adecvată este să spunem că însăși existența sarcinii pozitive creează, într-un anumit sens, o stare specială în spațiu, astfel că, atunci când introducem o sarcină negativă, asupra acesteia se exercită o forță. Această capacitate de a produce o forță se numește *câmp electric.* Când introducem un electron în câmpul electric, spunem că el este „atras“. Avem deci două reguli: (a) sarcinile produc un câmp și (b) asupra sarcinilor în câmpuri se exercită forțe care le pun în mișcare. De ce se întâmplă așa va deveni clar din discutarea următoarelor fenomene: dacă am încărca electric un corp, de pildă un pieptene, iar apoi am așeza o bucată de hârtie încărcată la o distanță și am mișca pieptenele încoace și încolo, hârtia va răspunde orientându-se mereu către pieptene. Dacă îl mișcăm mai repede, vom descoperi că hârtia rămâne puțin în urmă, *există o întârziere* în acțiune. (În primul stadiu, când mișcăm pieptenele destul

de încet dăm peste o complicație care este *magnetismul.* Influențele magnetice au de-a face cu *sarcinile în mișcare relativă*, astfel că forțele magnetice și forțele electrice pot fi în realitate atribuite unui singur câmp, ca două aspecte diferite ale exact aceluiași lucru. Un câmp electric variabil nu poate exista fără magnetism.) Dacă mișcăm hârtia încărcată la distanță mai mare, întârzierea e și mai mare. Atunci se observă un lucru interesant. Deși forțele dintre două obiecte încărcate ar trebui să varieze invers proporțional cu *pătratul* distanței, se găsește că atunci când o sarcină oscilează, influența ei se extinde cu foarte mult mai departe decât ne-am aștepta după această lege. Cu alte cuvinte, efectul ei descrește mai încet decât după legea inversului pătratului.

Iată o analogie: dacă ne aflăm într-un bazin cu apă și în imediata noastră apropiere plutește un dop, putem mișca acest dop direct împingând apa cu un altul. Dacă ați privi doar cele două *dopuri*, tot ce ați vedea ar fi că unul s-a mișcat imediat ca răspuns la mișcarea celuilalt — există un fel de *interacție* între ele. Desigur, ceea ce facem în realitate este perturbarea *apei*, iar *apa* perturbă apoi celălalt dop. Am putea inventa „legea“ după care dacă împingem puțin apa, un obiect apropiat din apă se va mișca. Dacă cel de-al doilea dop ar fi mai departe, desigur că în aceste condiții abia dacă se va urni, deoarece noi mișcăm apa doar *local.* Pe de altă parte, dacă agităm primul dop, intervine un alt fenomen, în care mișcarea apei se propagă din aproape în aproape sub formă de *unde.* Există astfel o influență la *distanță mult mai mare* decât înainte, o influență oscilatorie, care nu poate fi înțeleasă cu ajutorul interacției directe. Deci ideea interacției directe trebuie înlocuită prin ceva care să țină seama de exemplu de existența apei sau, în cazul electric, de ceea ce numim *câmp electromagnetic.*

Câmpul electromagnetic poate purta unde; unele dintre acestea constituie *lumina*, altele sunt folosite în *emisiunile*

*Tabelul 2.1.*

Spectrul electromagnetic

| Frecvența în oscilații/s | Denumirea | Comportare aproximativă |
|---|---|---|
| $10^2$ | Perturbație electrică | Câmp |
| $5 \cdot 10^5$—$10^6$ | Emisiune radio | Unde |
| $10^8$ | MF—TV | Unde |
| $10^{10}$ | Radar | Unde |
| $5 \cdot 10^{14}$—$10^{15}$ | Lumină | Unde |
| $10^{18}$ | Raze X | Particule |
| $10^{21}$ | Raze γ, nucleare | Particule |
| $10^{24}$ | Raze γ, artificiale | Particule |
| $10^{27}$ | Raze γ, din radiația cosmică | Particule |

radio, dar numele lor general este de *unde electromagnetice*. Ele pot avea diverse *frecvențe*. Singurul lucru care e într-adevăr diferit de la o undă la alta este *frecvența de oscilație*. Dacă mișcăm o sarcină încoace și încolo din ce în ce mai repede obținem o gamă întreagă de efecte diferite, care au toate în comun faptul că sunt caracterizate doar de un singur număr, numărul de oscilații pe secundă. Obișnuita „alimentare" pe care o obținem de la rețeaua electrică din pereții unei clădiri are o frecvență cam de o sută de cicli pe secundă. Dacă mărim frecvența la 500 sau 1 000 de kilocicli (1 kilociclu = 1 000 cicli) pe secundă, ajungem să comunicăm „prin aer", căci acesta este domeniul de frecvențe folosit în emisiunile de radio. (Desigur că aceasta nu are nimic a face cu *aerul*! Putem avea emisiuni de radio și fără aer.) Dacă mărim din nou frecvența, ajungem în domeniul folosit pentru MF și TV. Mergând încă mai departe, ajungem la anumite unde scurte folosite de exemplu pentru *radar*. Mai departe nu mai avem nevoie de un instrument ca să „vedem" undele, le putem „vedea" cu ochiul liber, în domeniul de frecvențe de la $5 \times 10^{14}$ la $5 \times 10^{15}$ cicli pe secundă ochii noștri ar vedea oscilația pieptenului încărcat (dacă l-am putea face să oscileze atât de repede) ca lumină roșie, albastră sau violetă, în funcție

de frecvenţă. Frecvenţele sub acest interval formează domeniul infraroşu, iar cele de deasupra sa, domeniul ultraviolet. Faptul că putem avea senzaţii vizuale într-un anumit interval de frecvenţe nu face acea parte a spectrului electromagnetic mai deosebită pentru fizician decât celelalte părţi, dar din punct de vedere general uman ea este fără îndoială mai interesantă. Dacă mergem încă mai sus cu frecvenţa, dăm de razele X. Razele X nu sunt altceva decât lumină de înaltă frecvenţă. Dacă mergem şi mai sus, obţinem razele gamma. Aceşti doi termeni, raze X şi raze gamma, sunt folosiţi aproape sinonim. De obicei razele electromagnetice care provin din nuclee sunt numite raze gamma, pe când cele de mare energie din atomi sunt numite raze X, dar la aceeaşi frecvenţă ele reprezintă acelaşi lucru, oricare ar fi sursa lor. Dacă mergem la frecvenţe şi mai înalte, să zicem la $10^{24}$ cicli pe secundă, găsim că putem produce aceste unde în mod artificial, de exemplu cu sincrotronul de aici de la Caltech. Putem găsi unde electromagnetice cu frecvenţe uluitor de înalte — cu o oscilaţie chiar de o mie de ori mai rapidă — în *razele cosmice.* Aceste unde nu pot fi controlate de noi.

## FIZICA CUANTICĂ

După ce am prezentat noţiunea de câmp electromagnetic şi faptul că acest câmp poate transporta unde, aflăm curând că aceste unde se comportă în realitate într-un mod straniu, care pare foarte neondulatoriu. La frecvenţe mai înalte ele se comportă mai mult ca *particule* decât ca unde! *Mecanica cuantică*, descoperită imediat după 1920, explică această comportare stranie. În anii de dinainte de 1920 concepţia spaţiului tridimensional şi a unui timp independent de el a fost transformată de Einstein mai întâi într-o combinaţie pe care o numim spaţiu-timp, iar apoi într-un spa-

țiu-timp *curbat*, pentru a reprezenta gravitația. Astfel „scena" a devenit spațiu-timpul, iar gravitația este pesemne o modificare a spațiu-timpului. Tot atunci s-a găsit că regulile descoperite pentru mișcările particulelor erau incorecte. Regulile mecanice ale „inerției" și „forței" — legile lui Newton — sunt *incorecte* în lumea atomilor. S-a descoperit că obiectele de dimensiuni microscopice nu se comportă *deloc* la fel ca obiectele de dimensiuni macroscopice. Asta face fizica dificilă — și foarte interesantă. Fizica este dificilă fiindcă modul în care se comportă obiectele microscopice este atât de „nefiresc"; nu avem o experiență directă în acest domeniu. Aici obiectele nu se comportă deloc așa cum suntem obișnuiți, astfel încât e imposibil să le descriem comportarea în alt mod decât cel analitic. E dificil și cere multă imaginație.

Mecanica cuantică are multe aspecte. În primul rând, ideea că o particulă are o localizare precisă și o viteză precisă nu mai este acceptată, fiind incorectă. Pentru a da un exemplu de cât este de greșită în această privință fizica clasică, există o regulă în mecanica cuantică conform căreia nu se poate determina simultan cu certitudine unde se află un obiect și cât de repede se mișcă. Incertitudinea în determinarea impulsului și incertitudinea în determinarea poziției sunt complementare, produsul celor două fiind constant. Putem scrie legea astfel: $\Delta x \, \Delta p = h/2\pi$; o vom explica în detaliu mai târziu. Această lege conține explicația unui foarte misterios paradox: dacă atomii sunt făcuți din sarcini plus și minus, de ce nu se neutralizează pur și simplu sarcinile minus cu sarcinile plus (de vreme ce ele se atrag una pe alta)? *De ce sunt atomii atât de mari?* De ce este situat nucleul în centru, iar electronii în jurul său? S-a crezut la început că aceasta se întâmplă fiindcă nucleul ar fi tot atât de mare ca atomul; dar nu, nucleul e *foarte mic.* Un atom are diametrul de circa $10^{-8}$ cm. Nucleul are un diametru de aproximativ

$10^{-13}$ cm. Dacă avem un atom și am vrea să-i vedem nucleul, ar trebui să-l mărim până ce întregul atom ar avea dimensiunea unei camere mari, iar atunci nucleul ar fi doar cât un grăunte pe care abia l-am putea zări cu ochiul liber. Aproape *toată masa* atomului este însă concentrată în acel *nucleu* infinitesimal. Ce împiedică electronii să cadă pur și simplu pe nucleu? Tocmai principiul amintit. Dacă electronii s-ar găsi în nucleu, le-am cunoaște poziția în mod precis, iar principiul de incertitudine ar cere atunci ca ei să aibă un impuls foarte *mare* și incert, adică o *energie cinetică* foarte mare. Cu această energie, s-ar smulge din atracția nucleului. Ei fac un compromis: își acordă puțin spațiu pentru incertitudinea în poziție și oscilează cu o anumită cantitate de mișcare minimă, în concordanță cu relația de incertitudine de mai sus. (Amintiți-vă că atunci când un cristal este răcit până la zero absolut, am spus că atomii nu încetează să se miște, ei continuă să oscileze. De ce? Dacă ar înceta să se miște, am ști unde se află și că mișcarea lor este nulă, iar aceasta contravine principiului de incertitudine. Nu putem ști în același timp unde se află atomii și cât de repede se mișcă, așa încât ei trebuie să vibreze acolo încontinuu!)

Altă schimbare foarte interesantă în ideile și filozofia științei adusă de mecanica cuantică este următoarea: nu e posibil să se prezică *exact* ce se va petrece în orice împrejurare. De exemplu, este posibil să avem un atom care e gata să emită lumină, captând particula numită foton, pe care o vom prezenta în curând. Nu putem însă prezice *când* va emite lumina sau, atunci când avem mai mulți atomi, *care* dintre ei o va face. Puteți spune că aceasta se întâmplă fiindcă există niște angrenaje interne care încă nu au fost analizate destul de atent. Nu, *nu există* asemenea angrenaje. Natura, așa cum o înțelegem astăzi, se comportă astfel încât este *total imposibil* să se facă o predicție precisă a *ceea ce se va petrece în mod exact* într-un experiment dat. E un lucru în-

grozitor, din moment ce filozofii afirmau înainte că una dintre cerințele fundamentale ale științei este că ori de câte ori condițiile sunt aceleași trebuie să se petreacă același lucru! *Nu e adevărat*, aceasta *nu* reprezintă o condiție fundamentală a științei. Nu se petrece același lucru, ci putem afla doar în medie, statistic, ce se va petrece. Și totuși știința nu s-a prăbușit complet. Filozofii spun multe despre ceea ce ar fi *absolut necesar* pentru știință, iar de fiecare dată ce spun e, după cum se poate vedea, destul de naiv și probabil greșit. De exemplu, un filozof sau altul a spus că e fundamental pentru efortul științific ca, dacă o experiență este efectuată, să zicem, la Stockholm, iar apoi aceeași experiență e făcută la Quito, *rezultatele să fie aceleași.* Această afirmație e complet falsă. Nu este necesar pentru *știință* să se întâmple așa ceva; poate fi un *fapt de experiență*, dar nu e necesar. De pildă, dacă una dintre experiențe constă în a privi cerul și a observa aurora boreală, la Stockholm o vezi, dar la Quito nu; e un fenomen diferit. „Dar“ puteți spune „asta e ceva care are de-a face cu exteriorul.“ Te poți închide într-o cameră la Stockholm și poți trage jaluzelele; vei observa vreo diferență? Bineînțeles. Dacă luăm un pendul și îl facem să oscileze, el va oscila practic într-un plan, dar nu întocmai. Planul se rotește încet și continuu la Stokholm, însă nu și la Quito (chiar dacă storurile sunt trase la ferestre!). Faptul că se întâmplă aceasta nu atrage după sine prăbușirea științei. Care *este* ipoteza fundamentală a științei, filozofia ei fundamentală? Am enunțat-o în primul capitol: *singurul test al validității oricărei idei este experiența.* Dacă se vădește că cele mai multe experiențe se desfășoară la fel la Quito ca și la Stockholm, aceste „cele mai multe experiențe“ vor fi utilizate pentru a formula o lege generală, iar despre experiențele care nu dau același rezultat vom spune că erau influențate de locul unde se află Stockholmul. Vom inventa un mod de a rezuma rezultatele experienței și nu trebuie

să ni se spună dinainte cum trebuie să arate acest mod. Dacă ni se spune că aceeași experiență va produce totdeauna același rezultat, foarte bine — nu e nici o supărare, dar dacă atunci când încercăm să verificăm aceasta constatăm că nu e adevărat, nu e adevărat și gata. Trebuie să acceptăm numai ceea ce constatăm, iar apoi să ne formulăm tot restul ideilor în raport cu experiența noastră reală.

Întorcându-ne din nou la mecanica cuantică și la fizica fundamentală, nu putem intra în detaliile principiilor mecanicii cuantice în acest moment, pentru că ele sunt destul de greu de înțeles. Le vom accepta ca fiind date și vom continua prezentând unele dintre consecințe. Mai întâi, lucruri pe care obișnuim să le considerăm drept unde se comportă de asemenea și ca particule, iar particulele se comportă ca unde; de fapt, toate se comportă în același fel. Nu există o distincție între undă și particulă. Astfel, mecanica cuantică *unifică* ideea de câmp și undele sale cu ideea de particulă. Este adevărat însă că la frecvență joasă aspectul de câmp al fenomenului e mai evident, sau mai util, pentru o descriere aproximativă în termenii experienței de fiecare zi. Dar pe măsură ce frecvența crește, devine mai evident aspectul de particulă al fenomenului, având în vedere aparatura cu care facem în mod obișnuit măsurătorile. De fapt, deși am menționat o mulțime de frecvențe, nici un fenomen implicând în mod direct o frecvență nu a fost încă detectat deasupra a aproximativ $10^{12}$ cicli pe secundă. Putem doar deduce frecvențele mai înalte din energia particulelor, printr-o regulă care presupune valabil conceptul undă-particulă al mecanicii cuantice.

Căpătăm astfel o nouă perspectivă asupra interacției electromagnetice. Avem un nou fel de *particulă* de adăugat la electron, proton și neutron. Această nouă particulă se numește *foton*. Noul mod de a concepe interacția electronilor și protonilor, adică teoria electromagnetică, în întregime

corect din punctul de vedere al mecanicii cuantice, se numește *electrodinamică cuantică.* Această teorie fundamentală a interacției luminii și substanței sau a câmpului electric și sarcinilor este cel mai mare succes al nostru de până acum în fizică. Ea conține regulile de bază pentru toate fenomenele uzuale, exceptând gravitația și procesele nucleare. De exemplu, din electrodinamica cuantică rezultă toate legile electrice, mecanice și chimice cunoscute: legile pentru ciocnirea bilelor de biliard, mișcările circuitelor în câmpuri magnetice, căldura specifică a oxidului de carbon, culoarea reclamelor de neon, densitatea sării, reacțiile hidrogenului și oxigenului pentru a produce apă, toate sunt consecințe ale acestei unice legi. Toate aceste detalii pot fi calculate dacă situația e destul de simplă pentru a putea face axproximații (ceea ce de fapt nu se întâmplă niciodată, dar putem înțelege adesea mai mult sau mai puțin ce se petrece). În momentul de față nu se cunosc excepții de la legile electrodinamicii cuantice în exteriorul nucleului, iar acolo nu știm dacă există excepții pentru simplul motiv că nu știm ce se petrece în nucleu.

În principiu, electrodinamica cuantică este teoria întregii chimii, și a vieții, dacă viața e în cele din urmă redusă la chimie și deci la fizică, pentru că chimia a fost deja redusă la fizică (partea fizicii care intervine în chimie este cunoscută). Mai departe, electrodinamică cuantică, această mare înfăptuire, prezice o mulțime de lucruri noi. În primul rând, ea ne dă proprietățile fotonilor de foarte mare energie, ale razelor gamma etc. Ea a prezis un alt fapt remarcabil: pe lângă electron trebuie să existe o altă particulă de aceeași masă, dar de sarcină opusă, numită *pozitron,* iar acestea două, reunindu-se, s-ar putea anihila una de alta, cu emisie de lumină sau raze gamma. (La urma urmei, lumina și razele gamma sunt același lucru, ele au doar frecvențe diferite.) Generalizarea acestui fapt, anume că pentru fiecare particulă există o antiparticulă, se vădește a fi adevărată, în cazul electronului, antiparticula are alt nume — pozitron, dar pentru

cele mai multe dintre particule ea se numește anti-cutare, de pildă antiproton sau antineutron. În electrodinamica cuantică sunt introduse *două numere* importante și se presupune că majoritatea celorlalte numere din lume rezultă din acestea. Cele două numere sunt masa și sarcina electronului. De fapt nu-i chiar așa, din moment ce în chimie avem o mulțime întreagă de numere care ne spun cât de grele sunt nucleele. Aceasta însă ne conduce la paragraful următor.

## Nuclee și particule

Din ce sunt alcătuite nucleele? Ce ține laolaltă părțile constituente ale unui nucleu? Se constată că aici intervin forțe enorme. Când acestea devin disponibile, energia eliberată este înspăimântătoare în comparație cu energia chimică, în același raport ca explozia bombei atomice față de o explozie de TNT (trinitrotoluen), deoarece bomba atomică are de-a face cu schimbări care se petrec în interiorul nucleului, pe când explozia de TNT are de-a face cu schimbări ale electronilor din învelișul extern al atomilor. Așadar, care sunt forțele ce țin protonii și neutronii laolaltă în nucleu?

Exact așa cum interacția electrică poate fi legată de o particulă, fotonul, Yukawa a sugerat că forțelor dintre neutroni și protoni le corespunde de asemenea un câmp de un anumit fel, iar, când acest câmp oscilează, se comportă ca o anumită particulă. Astfel, el a presupus că s-ar putea să existe și alte particule pe lume în afară de protoni și neutroni, și a fost în stare să deducă proprietățile acestor particule din caracteristicile deja cunoscute ale forțelor nucleare. De exemplu, Yukawa a prezis că ele trebuie să aibă o masă de două sau trei sute de ori mai mare decât a electronului. Și iată că în razele cosmice a fost descoperită la un moment dat o par-

ticulă cu masa corespunzătoare! A fost numită mezon μ sau miuon. Dar mai târziu s-a văzut că de fapt e o altă particulă, nu cea care trebuia.

Totuși, mai târziu, prin 1947–1948, s-a descoperit o altă particulă, mezonul π sau pionul, care satisfăcea criteriul lui Yukawa. Deci, pentru a obține forțele nucleare trebuie, pe lângă proton și neutron, să considerăm și pionul. Acum ați putea spune: „Grozav! Cu această teorie putem face nucleodinamică cuantică folosind pionii exact cum voia să facă Yukawa și vom vedea dacă treaba merge. Totul va fi astfel explicat." Ghinion! Se vădește că în această teorie intervin calcule atât de complicate încât nimeni nu a fost vreodată în stare să-și dea seama care sunt consecințele teoriei sau s-o verifice prin experiență. Această situație persistă și acum după douăzeci de ani!

Astfel, suntem legați de o teorie și nu știm dacă e corectă sau greșită; de fapt, știm că este *puțin* greșită sau măcar incompletă. În timp ce băteam pasul pe loc cu teoria noastră, încercând să calculăm consecințele acestei teorii, experimentatorii descopereau câteva lucruri noi. De exemplu, descoperiseră deja mezonul μ sau miuonul, căruia nu știm încă unde să-i găsim locul. De asemenea, în razele cosmice s-a descoperit un mare număr de particule „suplimentare". Astăzi cunoaștem aproximativ o sută de particule. Sunt greu de înțeles legăturile tuturor acestor particule între ele, precum și scopul în care natura le-a creat. Aceste diverse particule nu sunt concepute astăzi ca aspecte diferite ale aceluiași lucru, iar faptul că avem atât de multe particule necorelate se traduce prin existența a multe informații disparate, fără o teorie bună. După marele succes al electrodinamicii cuantice, există fără îndoială o anumită cantitate de cunoaștere în fizica nucleară, însă e o cunoaștere aproximativă, pe jumătate experimentală, pe jumătate teoretică, presupunându-se un tip de forță între protoni și neutron și deducând

de aici ce se întâmplă, dar fără a se înțelege cu adevărat de unde provin forțele. În afară de cele menționate, am făcut foarte puține progrese.

În cazul chimiei, a fost studiat un număr mare de elemente, însă aici a apărut dintr-odată o legătură neașteptată între aceste elemente, care e încorporată în tabelul periodic al lui Mendeleev. De exemplu, sodiul și potasiul sunt asemănători în proprietățile lor chimice și se găsesc în aceeași coloană a tabelului lui Mendeleev. S-a căutat un tabel de tipul Mendeleev pentru noile particule. Un asemenea tabel a fost creat independent de Gell-Mann în SUA și Nishijima în Japonia. Baza clasificării lor este un nou număr, asemănător cu sarcina electrică, ce poate fi atribuit fiecărei particule și se numește „stranietate", notată cu litera *S*. Ca și sarcina electrică, acest număr se conservă în reacțiile care au loc prin intermediul forțelor nucleare.

În tabelul 2.2* sunt înscrise o parte din noile particule. Nu putem discuta prea mult despre ele în stadiul în care ne aflăm, dar tabelul vă va arăta cel puțin cât de multe nu știm. Dedesubtul fiecărei particule este dată masa sa într-o anumită unitate, numită MeV. Un MeV corespunde la $1{,}782 \times 10^{-27}$ grame. Motivul pentru care a fost aleasă această unitate este istoric și nu-l vom examina acum. Particulele mai masive sunt așezate mai sus în diagramă; vedem că un neutron și un proton au aproape aceeași masă. În coloanele verticale am pus particulele cu aceeași sarcină electrică, toate cele neutre se află într-o coloană, toate cele încărcate pozitiv la dreapta acesteia și toate cele încărcate negativ la stânga.

Particulele sunt indicate cu o linie continuă, iar rezonanțele cu una întreruptă. Mai multe particule au fost omise din tabel. Între ele se numără importantele particule cu masă

* Tabelul 2.2 reproduce situația existentă la începutul anilor '60. (*N. red.*)

*Tabelul 2.2.*

Particule elementare

| Masa în GeV | Sarcina −e | Sarcina 0 | Sarcina +e | Grupa și stranietatea | |
|---|---|---|---|---|---|
| 1.4 | $Y_1^- \to \Lambda^0 + \pi^-$ | $Y_1^0 \to \Lambda^0 + \pi^0$ | $Y_1^+ \to \Lambda^0 + \pi^-$ 1395 | S = 2 | Leptoni |
| 1.3 | $\Xi^-$ 1319 | $\Xi^0$ 1311 | | S = 2 | |
| 1.2 | $\Sigma^-$ 1196 | $\Sigma^0$ 1191 | $\Sigma^+$ 1189 | S = 1 | |
| 1.1 | | $\Lambda^0$ 1115 | | S = 1 | |
| 1.0 | | | | | |
| | | n 939 | p 938 | S = 0 | |
| .9 | | | | | |
| .8 | | $\omega^0 \to \pi + \pi + \pi$ | | S = 0 | Mezoni |
| | $\rho^- \to \pi + \pi$ | $\rho^0 \to \pi + \pi$ | $\rho^+ \to \pi + \pi$ | S = 0 | |
| .7 | | | | | |
| .6 | | | | | |
| .5 | $K^-$ 494 | $K^0 \bar{K}^0$ 498 | $K^+$ 494 | S = −1, +1 | |
| .4 | | | | | |
| .3 | | | | | |
| .2 | | | | | |
| | $\pi^-$ 139.6 | $\pi^0$ 135.0 | $\pi^+$ 139.6 | S = 0 | |
| .1 | $\mu^-$ 105.6 | | | | Barioni |
| 0 | $e^-$ 0.51 | $\nu^0$ 0 | | | |

zero și sarcină zero, fotonul și gravitonul, care nu intră în schema de clasificare barion-mezon-lepton, și de asemenea multe din rezonanțele mai noi ($K^*$, $\varphi$, $\eta$). Antiparticulele mezonilor sunt înscrise în tabel, dar antiparticulele leptonilor și barionilor ar trebui înscrise în alt tabel, care ar arăta exact ca acesta însă oglindit față de coloana cu sarcină zero. Deși toate particulele, exceptând electronul, neutrino, fotonul, gravitonul și protonul, sunt instabile, produsele de dezintegrare au fost arătate numai pentru rezonanțe. Stranietatea nu se referă și la leptoni, întrucât ei nu interacționează tare cu nucleele.

Toate particulele care sunt așezate împreună cu neutronii și protonii se numesc *barioni.* Astfel, există un „lambda", cu o masă de 1154 MeV și alți trei, numiți „sigma" minus, neutru și plus, cu mai multe mase aproape egale. Există grupuri sau „multipleți" care au aproape aceeași masă, cu o aproximație de unu sau doi la sută. Fiecare particulă dintr-un multiplet are aceeași stranietate. Primul multiplet este dubletul proton-neutron, apoi există un singiet (lambda), iar apoi tripletul sigma și, în sfârșit, dubletul csi. Începând cu 1961, au fost găsite multe alte particule. Dar *sunt* ele într-adevăr particule? Ele trăiesc un timp atât de scurt, dezintegrându-se aproape instantaneu după ce se formează, încât nu știm dacă trebuie considerate drept noi particule sau ca un fel de interacție de „rezonanță", de energie determinată.

Pe lângă barioni, celelalte particule implicate în interacția nucleară se numesc *mezoni.* Mai întâi avem pionii, care apar în trei varietăți — pozitivi, negativi și neutri; ei formează un multiplet. Am găsit de asemenea niște obiecte noi, numite mezoni K; și ei apar ca un dublet $K^+$ și $K^0$. De asemenea, fiecare particulă are antiparticula sa, în afară de cazul când particula *este propria* sa antiparticulă. De exemplu $\pi^+$ și $\pi^-$ sunt antiparticule, dar $\pi^0$ este propria sa antiparticulă. $K^-$ și $K^+$ sunt antiparticule, la fel $K^0$ și $\overline{K^0}$. În plus, după 1961

s-au găsit de asemenea noi mezoni, sau mai bine zis „rezonanțe mezonice", care se dezintegrează aproape imediat. Așa de exemplu, există un obiect numit ω, care se dezintegrează în trei pioni și are o masă de 783 MeV.

După cum tabloul lui Mendeleev era foarte bun, exceptând faptul că existau un număr de elemente numite „pământuri rare" care atârnau în afara lui, tot așa avem un număr de lucruri care atârnă în afara acestui tablou — particule care nu interacționează tare nici în nuclee, nici între ele (mă refer la acel fel puternic de interacție de tipul interacției nucleare). Acestea se numesc leptoni. Există mai întâi electronul, care are o masă foarte mică — doar de 0,511 MeV. Apoi mezonul μ, care are o masă mult mai mare: este de 206 ori mai greu decât electronul. După câte putem spune din toate experiențele de până acum, electronul și miuonul diferă doar prin masă. Totul funcționează exact la fel pentru miuon și pentru electron, exceptând faptul că unul este mai greu decât celălalt. De ce există acest unul mai greu ? La ce bun ? Nu știm. În plus, există un lepton care e neutru, numit neutrino, cu masa zero. De fapt, se știe acum că există *două* tipuri diferite de neutrini, unul legat de electroni, iar celălalt legat de miuoni.

În sfârșit, mai sunt alte două particule care nu interacționează tare cu cele nucleare. Pe una o cunoaștem deja: fotonul. Dacă există un analog cuantic pentru câmpul gravitațional (o teorie cuantică a gravitației nu a fost încă elaborată), va exista încă o particulă, gravitonul, care va avea masa zero.

Ce este această „masă zero" ? Aici sunt date masele particulelor *în repaus.* Faptul că o particulă are masă zero înseamnă, într-un fel, că ea nu poate *fi în repaus.* Un foton nu e niciodată în repaus, el se mișcă totdeauna cu 300 000 de kilometri pe secundă. Vom înțelege mai bine ce înseamnă masa când vom analiza teoria relativității, la momentul potrivit.

Suntem astfel puși în fața unui mare număr de particule, care par a fi constituenții fundamentali ai materiei. Din fericire,

*Tabelul 2.3.*

Interacțiile elementare

| Cuplajul | Tăria* | Legea |
|---|---|---|
| Fotonul cu particule încărcate | $\sim 10^{-2}$ | Legea cunoscută |
| Gravitația cu orice energie | $\sim 10^{-40}$ | Legea cunoscută |
| Dezintegrările slabe | $\sim 10^{-5}$ | Legea parțial cunoscută |
| Mezonii cu barionii | $\sim 1$ | Legea necunoscută (se cunosc câteva reguli) |

aceste particule nu se comportă *toate* diferit în *interacțiile* lor una cu alta. De fapt, par să existe doar *patru feluri* de interacții între particule. În ordinea tăriei descrescânde, avem: interacția nucleară, interacțiile electrice, interacția din dezintegrarea beta și gravitația. Fotonul este cuplat cu toate particulele încărcate, iar tăria interacției este măsurată printr-un număr, care este 1/137. Legea detaliată a acestui cuplaj este cunoscută, fiind dată de electrodinamica cuantică. Gravitația interacționează cu orice *energie*, dar cuplajul său este extrem de slab, mult mai slab decât cel al electricității. Această lege e de asemenea cunoscută. Apoi există așa-numitele dezintegrări slabe — dezintegrarea beta, care face ca neutronul să se dezintegreze în proton, electron și neutrino, relativ încet. Această lege este doar parțial cunoscută.** Așa-numita interacție tare, interacția mezon-barion, are tăria unu pe această scară, iar legea e complet necunoscută, deși există un număr de reguli cunoscute, cum ar fi aceea că numărul de barioni nu se modifică în nici o reacție.***

* „Tăria este o măsură adimensională pentru constanta de cuplaj care intervine în fiecare interacție (~ înseamnă „aproximativ“). (*N. a.*)

** Între timp s-a realizat unificarea câmpului electromagnetic cu cel slab în cadrul teoriei elaborate de Sheldon Glashow, Abdus Salam și Steven Weinberg (toți trei au primit Premiul Nobel în 1979). (*N. red.*)

*** Cursul lui Feynman a fost ținut înainte ca fizicienii nucleariști să dezvolte (prin analogie cu electrodinamica cuantică) cromodinamica cuantică, teorie ce presupune existența cuarcilor, din care sunt alcătuiți hadronii (ansamblul barionilor și mezonilor). Deși pentru mulți

Iată deci care e teribila situație a fizicii actuale.* Pentru a rezuma, aș spune: în exteriorul nucleului se pare că știm totul; în interiorul lui e valabilă mecanica cuantică — nu s-a constatat că principiile mecanicii cuantice ar da greș. Scena pe care așezăm întreaga noastră cunoaștere, am spune, este spațiu-timpul relativist; poate că și gravitația este implicată în spațiu-timp. Nu știm cum s-a pus în mișcare universul. Nu am făcut niciodată experiențe care să controleze cu precizie ideile noastre despre spațiu și timp sub o anumită distanță foarte mică, așa că *știm* doar cum funcționează ideile noastre la distanțe mai mari. Trebuie să mai adăugăm că regulile jocului sunt principiile cuantice și că aceste principii se aplică, pe cât putem spune, noilor particule ca și celor vechi. Originea forțelor nucleare ne conduce la noi particule, dar din nefericire ele apar în mare abundență și ne lipsește o înțelegere completă a interdependenței lor, deși știm deja că există anumite raporturi surprizătoare între ele. S-ar părea că, bâjbâind, ne îndreptăm treptat către o înțelegere a lumii particulelor subatomice, dar nu știm cât de mult mai avem de mers în această direcție.

---

fizicieni teoria părea la început doar un artificiu matematic, Feynman a fost printre primii care au considerat că experimentele la energii înalte dovedeau realitatea cuarcilor, pe care Feynman îi numea partoni (din moment ce erau părți ale hadronilor). (*N. red.*)

* În prezent, eforturile fizicienilor preocupați de unificarea tuturor interacțiilor din natură se orientează cu precădere spre teoria corzilor (*string theory*) care pare deocamdată cel mai promițător candidat, dar, în esență, ideile expuse aici de Feynman își păstrează și azi valabilitatea. (*N. red.*)

# 3
# Legătura fizicii cu alte științe

## Introducere

Între științe, fizica este cea fundamentală și atotcuprinzătoare și a avut un efect profund asupra întregii dezvoltări a științei. De fapt, fizica este echivalentul din zilele noastre a ceea ce odinioară se numea *filozofie naturală*, care a dat naștere celor mai multe dintre științele noastre moderne. Studenții din multe domenii învață fizică datorită rolului esențial pe care îl joacă în toate fenomenele. În acest capitol vom încerca să deslușim care sunt problemele fundamentale ale celorlalte științe, dar e bineînțeles imposibil ca într-un spațiu atât de mic să tratezi în detaliu complexele, subtilele și minunatele chestiuni din aceste alte domenii. Lipsa de spațiu ne împiedică de asemenea să discutăm legătura fizicii cu tehnica, industria, societatea și războiul, sau chiar remarcabila legătură dintre matematică și fizică. (Matematica nu este o știință *naturală,* deoarece testul direct al validității sale nu este experiența.) Trebuie lămurit de la bun început faptul că, dacă ceva nu este o știință naturală, asta nu înseamnă neapărat că ar fi un lucru rău. De pildă, dragostea nu e o știință. Dacă se afirmă despre ceva că nu e o știință naturală nu înseamnă că ar fi ceva în neregulă, înseamnă pur și simplu că nu-i o știință.

## Chimia

Știința care e, poate, cel mai profund afectată de fizică este chimia. Din punct de vedere istoric, la începuturile sale chimia s-a ocupat aproape în întregime cu ceea ce numim astăzi chimie anorganică, chimia substanțelor care nu sunt asociate cu ființe vii. A fost nevoie de o analiză considerabilă pentru a se descoperi existența numeroaselor elemente chimice și raporturile dintre ele — cum formează ele diverși compuși relativ simpli găsiți în roci, pământ etc. Această chimie timpurie a fost foarte importantă pentru fizică. Interacția dintre cele două științe a fost puternică, fiindcă teoria atomistă s-a verificat în primul rând prin experiențe de chimie. Teoria chimiei, adică a reacțiilor înseși, a fost rezumată într-o mare măsură în tabloul periodic al lui Mendeleev, care scoate în evidență multe raporturi stranii între diversele elemente. Colecția de reguli care spun ce substanță se combină cu care și în ce fel reprezintă chimia anorganică. Toate aceste reguli au fost în cele din urmă explicate în principiu de mecanica cuantică, astfel încât chimia teoretică este de fapt fizică. Pe de altă parte, trebuie subliniat că această explicație este dată doar *în principiu.* Am discutat deja diferența dintre a ști regulile jocului de șah și a fi în stare să joci. Așa se face că putem cunoaște regulile, dar nu putem juca prea bine. Se dovedește foarte dificil de prezis corect ce se va petrece într-o reacție chimică dată; totuși, partea cea mai profundă a chimiei teoretice sfârșește în mecanică cuantică.

Există o ramură a fizicii și chimiei care a fost dezvoltată de ambele științe și care e extrem de importantă. Aceasta e metoda statisticii, aplicată în situația în care există legi mecanice, ceea ce se numește în limbaj adecvat *mecanică statistică.* În orice situație din chimie sunt implicați un mare număr de atomi și am văzut că atomii se mișcă toți într-un mod foarte dezordonat și complicat. Dacă am putea analiza fiecare ciocnire și am fi în stare să urmărim în detaliu miș-

carea fiecărei molecule, am putea spera să prezicem ce se va petrece. Mulțimea numerelor necesare pentru a urmări toate aceste molecule depășește însă într-o măsură uriașă capacitatea oricărui calculator, și cu atât mai mult capacitatea minții, încât a fost important să se dezvolte o metodă pentru tratarea unor asemenea situații complicate. Mecanica statistică este deci știința fenomenelor căldurii sau a termodinamicii. În esență, chimia anorganică este astfel redusă la ceea ce se numește chimie fizică și chimie cuantică. Chimia fizică studiază vitezele cu care decurg reacțiile și felul în care se petrec lucrurile în detaliu (cum se lovesc moleculele, ce produse de reacție sunt eliberate primele etc.), iar chimia cuantică ne ajută să înțelegem ce se petrece pe baza legilor fizice fundamentale.

Cealaltă ramură a chimiei este *chimia organică*, chimia substanțelor asociate cu ființele vii. Un timp s-a crezut că substanțele asociate cu ființele vii sunt atât de minunate încât ele nu pot fi produse de om din materiale anorganice. Ceea ce s-a dovedit complet fals — ele sunt exact la fel ca substanțele produse în chimia anorganică, doar dispunerea atomilor este mult mai complicată. Chimia organică are în mod evident o strânsă legătură cu biologia, care îi furnizează substanțele, și cu industria; în plus, chimia fizică și mecanica cuantică se aplică în aceeași măsură la studiul compușilor organici ca și al celor anorganici. Problemele principale ale chimiei organice nu țin însă de aceste aspecte, ci mai curând de analiza și sinteza substanțelor care se formează în sistemele biologice, în ființele vii. Aceasta conduce treptat, pe nesimțite către biochimie, iar apoi către biologie, de fapt către biologia moleculară.

## BIOLOGIA

Ajungem astfel la știința *biologiei*, care este studiul ființelor vii. În zilele de început ale acestei științe, biologii

erau confruntaţi cu problema pur descriptivă de a afla *ce* fiinţe vii există, aşa încât aveau doar de numărat lucruri cum ar fi firele de păr de pe picioarele puricilor. După ce aceste chestiuni au fost lămurite cu mare interes, biologii au intrat în *mecanismul* din interiorul corpurilor vii, la început doar în linii mari, pentru că se cere un efort ca să intri în detaliile mai fine.

A existat de timpuriu o interesantă legătură între fizică şi biologie, legătură prin care biologia a ajutat fizica la descoperirea *conservării energiei,* pentru prima dată demonstrată de Mayer în legătură cu cantitatea de căldură primită şi cedată de o fiinţă vie.

Dacă privim mai de îndeaproape procesele biologiei animalelor vii, vedem *multe* fenomene fizice: circulaţia sângelui, pompe, presiune etc. Există nervi: ştim ce se întâmplă când călcăm pe o piatră ascuţită şi că într-un fel sau altul informaţia merge de la picior în sus. E interesant cum se petrece fenomenul. În studiul nervilor, biologii au ajuns la concluzia că aceştia sunt tuburi extrem de fine, cu un perete complex, foarte subţire. Prin acest perete celula pompează ioni, astfel încât există ioni pozitivi în afară şi negativi înăuntru, ca într-un condensator. Or, această membrană are o proprietate interesantă: dacă „se descarcă“ într-un anumit loc — altfel spus, dacă unii dintre ioni au fost în stare s-o traverseze de-a curmezişul — astfel ca tensiunea electrică să fie redusă acolo, această influenţă electrică se face simţită asupra ionilor din vecinătate şi ea afectează membrana, astfel încât lasă să treacă ionii de-a curmezişul şi în punctele învecinate. Aceasta, la rândul său, o afectează mai departe etc., iar astfel apare o undă de „penetrabilitate“ a membranei care se propagă atunci când ea este „excitată“ la un capăt, de exemplu prin călcarea pe piatră ascuţită. Această undă este oarecum analogă cu ceea ce se întâmplă cu un lung şir de piese de domino aşezate vertical atunci când este răsturnată piesa de la capăt: aceasta o răstoarnă pe următoarea etc. Evident,

astfel se va transmite doar un singur mesaj, dacă piesele de domino nu sunt ridicate din nou în picioare. În mod similar, în celula nervoasă există procese care pompează încet ionii din nou afară, spre a pregăti nervul pentru impulsul următor. Așa se face că știm ce facem (sau cel puțin unde ne aflăm). Efectele electrice asociate cu acest impuls nervos pot fi desigur puse în evidență cu instrumente electrice și, pentru că *există* efecte electrice, în mod evident fizica proceselor electrice a avut o mare importanță în înțelegerea fenomenului.

Fenomenul invers constă din faptul că de undeva din creier se transmite spre exterior un mesaj de-a lungul unui nerv. Ce se petrece la capătul nervului ? Acolo nervul are ramifacații fine, conectate cu o structură de lângă un mușchi, o placă terminală. Pentru motive care nu sunt înțelese exact, când impulsul ajunge la capătul nervului sunt expulzate mici cantități dintr-o substanță chimică numită acetilcolină (cinci până la zece molecule o dată), iar aceasta afectează fibra musculară făcându-o să se contracte — ce simplu ! Ce face ca un mușchi să se contracte ? Mușchiul este format dintr-un mare număr de fibre așezate diferit, miozina și actomiozina, dar mecanismul prin care reacția chimică indusă de acetilcolină poate modifica dimensiunile moleculei nu este încă cunoscut. Astfel, procesele fundamentale din mușchi, care produc mișcările mecanice, nu sunt cunoscute.

Biologia este un domeniu atât de vast încât există multe alte probleme pentru prezentarea cărora nu avem spațiul necesar — cum funcționează vederea (ce efect produce lumina asupra ochiului), cum funcționează auzul etc. (Modul în care funcționează *gândirea* va fi discutat mai târziu, în secțiunea dedicată psihologiei.) Dar toate aceste probleme menționate nu sunt, de fapt, din punct de vedere biologic fundamentale, ele nu se află la temelia vieții. Fac această afirmație în sensul următor: chiar dacă le-am înțelege, tot n-am înțelege viața însăși. Iată un exemplu: cei care studiază nervii simt

că munca lor e foarte importantă, fiindcă în definitiv nu poţi avea animale fără nervi. Dar *poţi* avea *viaţă* fără nervi. Plantele nu au nici nervi, nici muşchi, şi totuşi ele există, trăiesc. Aşa încât, pentru problemele fundamentale ale biologiei, trebuie să privim mai în profunzime. Descoperim astfel că toate fiinţele vii au o mulţime de trăsături comune. În primul rând, ele sunt alcătuite din *celule*, în interiorul cărora există un mecanism complex capabil să iniţieze procese chimice. În celulele plantelor, de exemplu, există un mecanism pentru captarea luminii şi producerea zaharozei, care e consumată apoi în întuneric spre a menţine planta în viaţă. Când planta este mâncată, aceeaşi zaharoză generează în animal o serie de reacţii chimice foarte strâns legate de fotosinteza din plante (şi de efectul său opus, în întuneric).

În celulele sistemelor vii au loc numeroase reacţii chimice complicate în care un compus este transformat în mulţi alţii. Pentru a da o idee despre enormele eforturi făcute în studiul biochimiei, diagrama din figura 3.1 rezumă cunoştinţele noastre de până acum despre o mică parte din numeroasele serii de reacţii care se produc în celule, poate aproximativ unu la sută.

Vedem aici o întreagă serie de molecule care se transformă una în alta într-un şir sau ciclu de etape destul de mici. El se numeşte ciclu Krebs, ciclul respirator. Fiecare dintre substanţele chimice şi fiecare dintre etape este destul de simplă în ceea ce priveşte transformarea petrecută în moleculă, dar — şi aceasta constituie o descoperire de importanţă esenţială în biochimie — aceste transformări sunt *relativ dificil de efectuat într-un laborator*. Dacă avem o anume substanţă şi o alta foarte asemănătoare, prima nu trece pur şi simplu în cealaltă, pentru că cele două forme sunt de obicei separate printr-o barieră de energie, un „deal". Să facem următoarea analogie: dacă am vrea să ducem un obiect dintr-un loc într-altul, la acelaşi nivel, dar de cealaltă parte a unui deal, l-am putea împinge pe deasupra vârfului, dar pen-

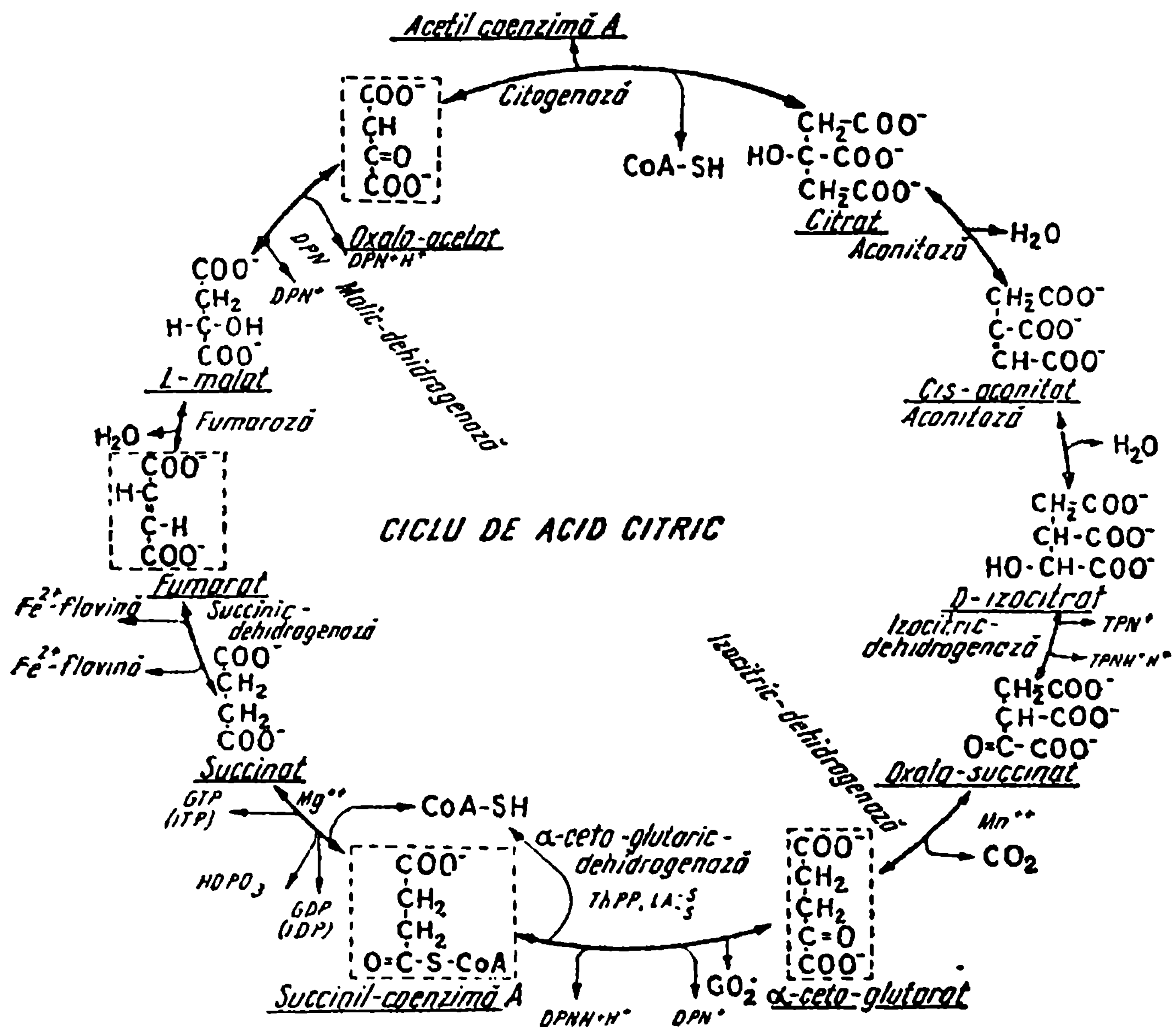



*Fig. 3.1.* Ciclul Krebs

tru asta e nevoie de energie. Astfel, multe reacţii chimice nu au loc fiindcă se intercalează pe drum cu ceea ce se numeşte *energia de activare.* Pentru a adăuga un atom suplimentar la substanţa noastră chimică e necesar să-l aducem suficient de *aproape* pentru a se produce o rearanjare; atunci el se va alipi. Dacă nu-i putem da destulă energie pentru a-l aduce suficient de aproape, el nu va putea ajunge la ţintă, ci va urca doar o parte din „deal“, iar apoi va coborî înapoi. Dacă însă am putea literalmente lua moleculele în mână, împingând şi trăgând atomii astfel încât să practicăm o gaură pentru a introduce noul atom, iar apoi am lăsa-o să se închidă la loc, am avea la dispoziţie o altă cale, *în jurul* dealului, care nu ar reclama energie suplimentară, iar reacţia ar decurge uşor. *Există* într-adevăr în celule molecule *foarte* mari, mult mai mari decât cele ale căror transformări le-am descris, care într-un mod complicat ţin moleculele mai mici exact aşa cum

trebuie pentru ca reacția să se poată produce cu ușurință. Aceste structuri foarte mari și complicate se numesc *enzime*. (Ele au fost numite inițial fermenți, fiindcă au fost descoperite în fermentația zahărului. De fapt, câteva dintre primele reacții ale ciclului Krebs au fost descoperite acolo.) În prezența unei enzime reacția va avea loc.

O enzimă este alcătuită dintr-o substanță numită *proteină*. Enzimele sunt foarte mari și complicate, diferite între ele, iar fiecare este construită pentru a controla o anumită reacție. Numele enzimelor sunt scrise în figura 3.1 la fiecare reacție. (Uneori aceeași enzimă poate controla două reacții.) Subliniem că enzimele, ele însele, nu sunt direct implicate în reacție. Ele nu se modifică, ci au pur și simplu rolul de a permite unui atom să treacă dintr-o parte într-alta. După ce a făcut acest lucru cu o moleculă, enzima e gata să-l repete cu următoarea, ca o mașinărie dintr-o uzină. Desigur, trebuie să existe un stoc cu anumiți atomi și un mod de a îndepărta atomii inutili. Să luăm de exemplu hidrogenul: există enzime care conțin unități speciale ce transportă hidrogenul pentru toate reacțiile chimice. De pildă, sunt trei sau patru enzime reducătoare de hidrogen care sunt folosite de-a lungul întregului nostru ciclu în diferite locuri. E interesant că mecanismul care eliberează hidrogen într-un anumit loc îl va prelua pentru a-l folosi în altă parte.

Cea mai importantă trăsătură a ciclului din figura 3.1 este transformarea de la GDP la GTP (guanadin-2-fosfat în guanadin-3-fosfat) pentru că una dintre substanțe are mult mai multă energie decât cealaltă. Exact așa cum există în anumite enzime o „cutie“ pentru a transporta atomi de hidrogen, există „cutii“ speciale care transportă *energie*, punând în joc grupul trifosfat. Astfel, GTP are mai multă energie decât GDP, iar, dacă ciclul se desfășoară numai într-un sens, producem molecule care au energie suplimentară. Acestea pot pune în mișcare un alt ciclu care *cere* energie, de exemplu

contracția unui mușchi. Mușchiul nu se va contracta decât dacă există GTP. Putem lua o fibră musculară, putem s-o punem în apă și să adăugăm GTP, iar fibra se va contracta, transformând GTP în GDP, dacă sunt prezente enzimele necesare. Astfel, esența problemei stă în transformarea GDP-GTP. În întuneric, GTP care a fost înmagazinat în timpul zilei este folosit pentru a face să funcționeze întregul ciclu în sens invers. Vedeți că unei enzime nu-i pasă în ce sens decurge reacția, căci dacă i-ar păsa ar viola una din legile fizicii.

Fizica este de mare importanță în biologie și în alte științe pentru încă un motiv, legat de *tehnicile experimentale*. De fapt, fără puternica dezvoltare a fizicii experimentale, toate aceste scheme biochimice nu ar fi cunoscute astăzi. Motivul este că cea mai utilă metodă pentru a analiza acest sistem fantastic de complex este să se *marcheze* atomii folosiți în reacții. Astfel, dacă am putea introduce în ciclu niște dioxid de carbon care să aibă un „semn verde“ pe el, iar apoi după trei secunde să măsurăm unde se află semnul verde, să măsurăm iarăși după zece secunde etc., am putea trasa desfășurarea reacțiilor. Ce sunt de fapt „semnele verzi“ ? Sunt diferiți *izotopi*. Reamintim că proprietățile chimice ale atomilor sunt determinate de numărul de *electroni*, nu de masa nucleului. Dar pot exista, de exemplu în carbon, șase neutroni sau șapte neutroni, împreună cu cei șase protoni pe care îi au toate nucleele de carbon. Din punct de vedere chimic, cei doi atomi $C^{12}$ și $C^{13}$ sunt la fel, dar ei diferă în greutate și au proprietăți nucleare diferite, astfel încât pot fi deosebiți. Folosind acești izotopi de diferite greutăți, sau chiar izotopi radioactivi precum $C^{14}$, care furnizează un mijloc mai sensibil pentru a observa cantități foarte mici, este posibil să se urmărească reacțiile.

Ne întoarcem acum la descrierea enzimelor și proteinelor. Nu toate proteinele sunt enzime, dar toate enzimele sunt

proteine. Există multe proteine, cum ar fi proteinele din mușchi, proteinele structurale din cartilagii, păr, piele etc., care nu sunt ele însele enzime. Totuși, proteinele sunt o substanță caracteristică vieții: mai întâi, din ele sunt constituite toate enzimele și, în al doilea rând, din ele este constituită o mare parte din restul materiei vii. Proteinele au o structură foarte interesantă și simplă. Ele sunt un șir, sau lanț, de diferiți *aminoacizi*. Există douăzeci de aminoacizi diferiți și toți se pot combina între ei spre a forma lanțuri în care coloana vertebrală este CO–NH etc. Proteinele nu sunt altceva decât lanțuri de diverși aminoacizi dintre cei douăzeci. Fiecare dintre aminoacizi servește probabil unui scop special. Unii, de exemplu, au un atom de sulf într-un anumit loc; când în această proteină sunt doi atomi de sulf, ei formează o legătură, adică ei leagă lanțul laolaltă în două puncte formând o buclă. Altul are atomi de oxigen suplimentari care îl fac să fie o substanță acidă, iar altul are o caracteristică bazică. Unii dintre ei au grupuri mari atârnând într-o parte, astfel încât ocupă mult spațiu. Un aminoacid, numit prolen, nu este în realitate un amino-, ci un iminoacid. Există o mică diferență care face ca atunci când lanțul conține prolen să apară un nod în lanț. Dacă am vrea să fabricăm o anumită proteină, am da aceste instrucțiuni: pune aici unul din cârligele acelea de sulf; adaugă apoi ceva care să ocupe spațiu; apoi atașează ceva care să facă un nod pe lanț. Astfel vom obține un lanț cu aspect complicat, având bucle și o structură complexă; acesta este probabil tocmai modul în care sunt produse toate enzimele. Unul dintre marile triumfuri ale timpurilor anilor din urmă (din 1960 încoace) a fost descoperirea aranjării atomice spațiale exacte a anumitor proteine, care conțin cam cincizeci și șase sau șaizeci de atomi într-un șir. Peste o mie de atomi (mai aproape de două mii, dacă socotim și atomii de hidrogen) au fost descoperiți în structura complexă a două proteine. Prima a fost hemoglo-

bina. Unul din aspectele triste ale acestei descoperiri este că nu înţelegem nimic din această structură; nu înţelegem de ce funcţionează ea aşa cum funcţionează. Desigur, aceasta e o problemă care trebuie rezolvată.

O altă problemă este: de unde „ştiu“ enzimele ce trebuie să fie? O muscă cu ochii roşii face un pui cu ochi roşii şi astfel pentru întreaga structură de enzime informaţia legată de producerea pigmentului roşu trebuie transmisă de la o muscă la următoarea. Aceasta se realizează printr-o substanţă din nucleul celulei, care nu e o proteină, numită ADN (prescurtare pentru acid dezoxiribonucleic). Această substanţă-cheie e transmisă dintr-o celulă într-alta şi transportă informaţiile despre felul în care trebuie fabricate enzimele. Cum arată ADN-ul şi cum funcţionează el? Mai întâi, el trebuie să fie în stare să se reproducă. În al doilea rând, el trebuie să fie în stare să instruiască proteina. În privinţa reproducerii, ne-am putea închipui că aceasta are loc la fel ca reproducerea celulelor. Celulele cresc, iar apoi se divid în două. Să se întâmple oare acelaşi lucru cu moleculele de ADN, să crească şi ele, iar apoi să se dividă în două? Bineînţeles că nu, un *atom* nu creşte şi nu se divide în două! Pentru a reproduce o moleculă, e nevoie de un mecanism mult mai ingenios.

Structura substanţei ADN a fost studiată multă vreme, mai întâi chimic spre a-i găsi compoziţia, iar apoi cu raze X pentru a-i determina structura spaţială. Rezultatul a fost următoarea descoperire remarcabilă: molecula de ADN este formată dintr-o pereche de lanţuri, răsucite unul în jurul altuia. Coloana vertebrală a fiecăruia din aceste lanţuri, care sunt analoge lanţurilor de proteine dar chimic cu totul diferite, e formată dintr-o serie de grupări de zahăr şi fosfat, după cum se arată în figura 3.2. Acum vedem cum poate să conţină lanţul instrucţiuni, căci dacă l-am despica la mijloc am avea o secvenţă BAADC..., fiecare fiinţă vie putând

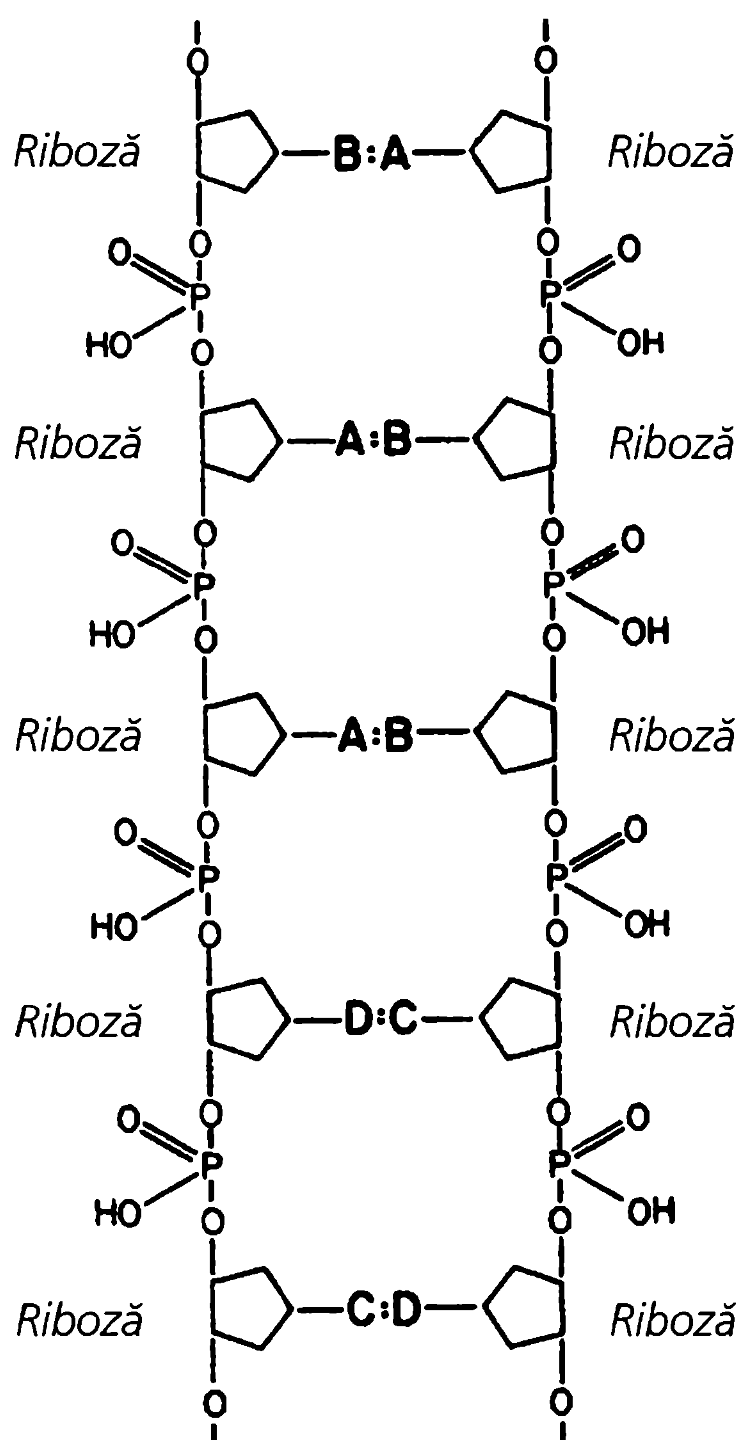



*Fig. 3.2.* Diagrama schematică a AND-ului

avea o secvenţă diferită. Astfel, poate că *instrucţiunile* specifice pentru fabricarea proteinelor sunt conţinute în *secvenţa* specifică din ADN.

Există, ataşate de fiecare grupare de zahăr de-a lungul şirului şi legând cele două lanţuri laolaltă, nişte perechi de legături transversale. Ele nu sunt toate de acelaşi fel; există patru feluri, numite adenină, timină, citozină şi guanină, dar să le numim *A*, *B*, *C* şi *D*. Faptul interesant este că numai anumite perechi pot sta faţă în faţă, de exemplu *A* cu *B* şi *C* cu *D*. Aceste perechi sunt aşezate în cele două lanţuri astfel încât „se potrivesc una cu alta", având o puternică energie

de interacţie. Dar *C* nu se potriveşte cu *A*, iar *B* nu se potriveşte cu *C*; se potrivesc numai în perechi, *A* cu *B* şi *C* cu *D*. Deci dacă una este *C*, cealaltă trebuie să fie *D* etc. Oricare ar fi literele dintr-un lanţ, fiecare trebuie să-şi aibă litera complementară, specifică în celălalt lanţ.

Cum are loc atunci reproducerea? Să presupunem că despicăm acest lanţ în două. Cum putem face un altul exact la fel? Dacă, în substanţele celulelor, există departamente de producţie care fabrică grupări de fosfat, zahăr şi *A*, *B*, *C*, *D* nelegate într-un lanţ, singurele care se vor ataşa la lanţul nostru despicat vor fi cele care trebuie, anume complementele lui *BAADC* ..., adică *ABBCD* ... Aşadar, lanţul se despică la mijloc în timpul diviziunii celulare, una din jumătăţi plecând cu o celulă, cealaltă jumătate cu cealaltă celulă. După ce s-au separat, câte un nou lanţ complementar este fabricat de fiecare din jumătăţi.

Urmează întrebarea: în ce fel anume determină ordinea unităţilor *A*, *B*, *C*, *D* aranjarea aminoacizilor din proteină? Aceasta este o problemă centrală încă nerezolvată în biologie astăzi. Primele indicii sunt totuşi următoarele. Există în celulă particule minuscule numite microzomi şi se ştie astăzi că acesta este locul unde sunt fabricate proteinele. Dar microzomii nu se află în nucleu, acolo unde se află AND-ul cu instrucţiunile sale. Pare să fie ceva semnificativ. Totuşi, se mai ştie că mici bucăţi de moleculă se desprind de ADN — nu atât de lungi ca molecula mare de ADN care transportă informaţia, ci cât o mică secţiune din ea. Ele se numesc ARN, dar nu aceasta e esenţial. Avem un fel de copie a AND-ului, o copie prescurtată. ARN-ul, care transportă într-un mod oarecare un mesaj despre ce fel de proteină să se producă, trece la microzom; acest fapt se cunoaşte. Când ajunge acolo, în microzom se sintetizează proteina. Aceasta de asemenea se cunoaşte. Dar detaliile despre cum sosesc şi cum sunt aranjaţi aminoacizii în conformitate cu codul care

se află în ARN sunt deocamdată necunoscute. Nu știm cum să-l citim. Cunoscând, de exemplu, ordinea *A, B, C, C, A* nu am putea spune care proteină va fi produsă.

Desigur că în prezent nici un domeniu nu face mai mari progrese pe atât de multe fronturi ca biologia. Dacă ar fi să numim cea mai puternică dintre toate ipotezele care ne conduc tot mai departe în încercarea de a înțelege viața, aceasta este că *toate lucrurile sunt alcătuite din atomi*, iar orice fac ființele vii poate fi înțeles în termeni de oscilații și mișcări ale atomilor.

## Astronomia

În această explicație-fulger a întregii lumi, să ne îndreptăm acum spre astronomie. Astronomia este mai veche decât fizica. De fapt, ea a dat naștere fizicii arătând frumoasa simplitate a mișcării stelelor și planetelor, iar înțelegerea acestei mișcări a fost *începutul* fizicii. Dar dintre toate descoperirile astronomiei cea mai remarcabilă este aceea că *stelele sunt alcătuite din atomi de același fel cu cei de pe Pământ**.

Cum s-a demonstrat aceasta? Atomii emit lumină care are anumite frecvențe bine definite, la fel cum un instru-

* Cât de repede trec peste toate acestea! Cât de multe conține fiecare frază din această scurtă istorisire! „Stelele sunt alcătuite din aceiași atomi ca și Pământul." De obicei aleg un mic subiect ca acesta ca să țin o conferință.

Poeții spun că știința răpește din frumusețea stelelor, reducându-le la simple îngrămădiri de atomi de gaz. Dar nimic nu e „simplu". Și eu pot privi stelele într-o noapte senină, și eu le pot simți. Dar văd oare mai puțin sau mai mult? Nemărginirea cerurilor îmi înaripează imaginația — micul meu ochi poate zări lumina de acum un milion de ani. O vastă structură, din care eu sunt o parte. Poate că materia din care sunt alcătuit a fost aruncată din vreo stea uitată, căci au loc erupții acolo. Sau închipuiți-vă că le-ați privi pe toate, cu ochiul uriaș al observatorului de la Mount Palomar, îndepărtându-se de un punct comun de plecare unde

ment muzical are anumite înălţimi sau frecvenţe ale sunetului bine definite. Când ascultăm concomitent mai multe tonuri diferite le putem deosebi unul de altul, dar când privim cu ochii un amestec de culori nu putem spune din ce componente este constituit, deoarece ochiul e departe de a fi atât de perspicace ca urechea în această privinţă. Totuşi, cu un spectroscop *putem* analiza frecvenţele undelor de lumină, iar în acest mod putem vedea înseşi „tonurile" atomilor care există în diferitele stele. De fapt, două din elementele chimice au fost descoperite în stele înainte de a fi descoperite pe Pământ. Heliul a fost descoperit în Soare, de unde numele său, iar techneţiul a fost descoperit în anumite stele reci. Aceasta, desigur, ne permite să avansăm în înţelegerea stelelor, deoarece ele sunt alcătuite din aceleaşi feluri de atomi care există şi pe Pământ. Or, ştim o mulţime de lucruri despre atomi, în special despre comportarea lor în condiţii de temperatură înaltă, dar densitate nu prea mare, astfel încât putem analiza prin mecanica statistică comportarea substanţei stelare. Deşi nu putem reproduce condiţiile pe Pământ, folosind legile fizice fundamentale putem adesea prezice cu precizie, sau cu o foarte bună aproximaţie, ce se va petrece. Astfel, fizica ajută astronomia. Oricât de ciudat ar părea, înţelegem distribuţia materiei în interiorul Soarelui cu mult mai bine decât înţelegem interiorul Pământului. Ceea ce se întâmplă *în interiorul* unei stele e mai bine înţeles decât s-ar putea bănui, ţinând seama de dificultatea de a scruta un punct luminos cu ajutorul unui telescop, fiindcă în majoritatea împrejurărilor putem *calcula* ceea ce ar trebui să facă atomii din stele.

---

poate că iniţial erau adunate laolaltă. Care este planul, semnificaţia, *de ce*-ul? Misterul rămâne intact chiar dacă ştii câte ceva despre el. Căci adevărul e cu mult mai minunat decât şi-a închipuit orice artist din trecut! De ce poeţii din ziua de azi nu vorbesc despre el? Ce fel de oameni sunt poeţii care sunt în stare să vorbească despre un Jupiter cu chip de om, dar tac dacă este o gigantică sferă rotitoare de metan şi amoniac? (*N. a.*)

Între cele mai impresionante descoperiri se numără cea legată de originea energiei stelelor, care le face să continue să ardă. Unul dintre descoperitori a ieșit cu prietena sa tocmai în seara zilei când și-a dat seama că în stele trebuie să se desfășoare *reacții nucleare* pentru a le face să strălucească. „Uite ce frumos strălucesc stelele!" zise ea. „Da, răspunse el, și în acest moment sunt singurul om din lume care știe *de ce* strălucesc ele." Dar ea a râs de el. Nu a fost deloc impresionată de faptul că se plimba cu singurul om care, în acel moment, știa de ce strălucesc stelele. E trist să fii singur, dar n-ai ce face, așa stau lucrurile pe lumea asta.

„Arderea" nucleară a hidrogenului este cea care furnizează energia Soarelui; hidrogenul e transformat în heliu. Mai mult, producerea diverselor elemente chimice se desfășoară în centrul stelelor, din hidrogen. Materia din care suntem și *noi* alcătuiți a fost „gătită" cândva într-o stea, iar apoi aruncată afară. De unde știm asta? Există un indiciu. Proporția diferiților izotopi — procentul de $C^{12}$, de $C^{13}$ etc. — este ceva care nu se schimbă niciodată în reacțiile *chimice*, fiindcă reacțiile chimice sunt aceleași pentru toți izotopii. Proporțiile sunt doar rezultatul reacțiilor *nucleare*. Cercetând proporțiile izotopilor din tăciunii reci și stinși care suntem noi, putem descoperi cum arăta *cuptorul* unde s-a format materialul din care suntem alcătuiți. Acest cuptor arăta la fel cu stelele și astfel e foarte probabil că elementele noastre au fost „fabricate" în stele și expulzate prin explozii pe care le numim nove și supernove. Astronomia e atât de înrudită cu fizica încât vom studia multe obiecte astronomice de-a lungul cursului.

## Geologia

Ne îndreptăm acum atenția către ceea ce se cheamă *științele despre Pământ* sau *geologie*. Să începem cu meteorologia și

cu vremea. Desigur, *instrumentele* meteorologiei sunt instrumente fizice, iar dezvoltarea fizicii experimentale a făcut posibile aceste instrumente, după cum s-a arătat mai sus. Totuși, teoria meteorologiei nu a putut fi încă elaborată în mod satisfăcător de fizicieni. „Bine", puteți spune, „dar nu avem de-a face decât cu aer și cunoaștem ecuațiile mișcării aerului." Da, le cunoaștem. „Așa încât, dacă cunoaștem starea aerului astăzi, de ce nu putem calcula starea aerului mâine?" Mai întâi, nu știm *cu adevărat* care e starea astăzi, fiindcă aerul se învârte și se răsucește pretutindeni. Se dovedește a fi foarte sensibil și instabil. Dacă ați văzut vreodată apa trecând lin pe deasupra unui dig și transformându-se apoi într-un mare număr de stropi și picături în timp ce cade, veți înțelege ce vreau să spun prin instabil. Cunoașteți starea apei înainte ca ea să treacă peste dig: ea este perfect lină; dar în momentul când începe să cadă, unde încep picăturile? Ce anume determină cât de mari vor fi picăturile și unde vor fi ele? Nu se știe, fiindcă apa este instabilă. Chiar o masă de aer care se mișcă lin, trecând peste un munte se transformă în vârtejuri și învolburări complexe. În multe domenii găsim această situație a *curgerii* turbulente pe care nu o putem analiza astăzi. Părăsim în grabă vremea ca să vorbim despre geologie!

Întrebarea fundamentală pentru geologie este: ce face ca Pământul să fie așa cum este? Cele mai evidente procese se află în fața propriilor noștri ochi — procesele de eroziune datorate râurilor, vânturilor etc. E destul de ușor să le înțelegem, dar pentru fiecare fărâmă de eroziune există o cantitate egală de altceva care intervine. Munții nu sunt mai puțin înalți, în medie, astăzi decât erau în trecut. Trebuie să existe procese de *formare* a munților. Veți afla, dacă studiați geologia, că *există într-adevăr* procese de formare a munților și de vulcanism pe care nimeni nu le înțelege încă, și care reprezintă jumătate din geologie. Fenomenul vulcanilor nu

e înţeles cu adevărat. La urma urmelor, nu se înţelege nici ce produce un cutremur de pământ. Se înţelege că dacă ceva împinge altceva, acest altceva se va rupe şi va aluneca — asta e limpede. Dar cine împinge şi de ce? Teoria spune că există înăuntrul Pământului curenţi datoraţi diferenţei de temperatură între interior şi exterior, curenţi care, în mişcarea lor, împing uşor suprafaţa. Aşadar, dacă există doi curenţi opuşi unul lângă altul, materia se va aduna în regiunea unde ei se întâlnesc şi va crea lanţuri de munţi care se află într-o stare nefericită de tensiune, dând naştere la vulcani şi cutremure.

Dar interiorul Pământului? Se ştiu multe despre viteza undelor seismice prin Pământ şi despre distribuţia densităţii Pământului. Totuşi, fizicienii nu au fost în stare să elaboreze o teorie bună despre cât de densă trebuie să fie o substanţă la presiunile care se bănuiesc a fi în centrul Pământului. Cu alte cuvinte, nu ne putem imagina prea bine proprietăţile materiei în aceste condiţii. Ne descurcăm mult mai rău cu Pământul decât cu materia din stele. Matematica implicată pare deocamdată prea dificilă, dar poate că nu va trece mult până când cineva îşi va da seama că e o problemă importantă şi o va rezolva cu adevărat. Pe de altă parte, chiar şi dacă am cunoaşte densitatea, nu ne-am putea imagina curenţii din interior. De asemenea, nu putem calcula proprietăţile rocilor la presiuni înalte. Nu putem spune cât de repede trebuie să „cedeze“ rocile; toate acestea trebuie rezolvate prin experienţă.

## Psihologia

Să discutăm acum despre ştiinţa *psihologiei.* În treacăt fie spus, psihanaliza nu este o ştiinţă: e în cel mai bun caz un procedeu medical, poate mai curând un soi de vrăjitorie medicală. Ea dispune de o teorie despre ceea ce provoacă boala

— o mulțime de „spirite“ etc. Vraciul are teoria că o boală precum malaria e provocată de un spirit care plutește în aer; boala nu se vindecă scuturând un șarpe deasupra capului bolnavului, în schimb chinina ajută în caz de malarie. Așa încât, dacă sunteți bolnavi, vă sfătuiesc să mergeți la vraci, pentru că, dintre toți oamenii din trib, el este cel care cunoaște cele mai multe lucruri despre boală. Pe de altă parte, cunoașterea lui nu este știință. Psihanaliza nu a fost testată experimental cu atenție și nu există o listă cu numărul cazurilor în care a dat rezultate, numărul cazurilor în care nu are efect etc.

Celelalte ramuri ale psihologiei, care implică lucruri precum fiziologia senzației — ce se petrece în ochi și ce se petrece în creier —, sunt, dacă vreți, mai puțin interesante, însă un mic, dar real progres a fost realizat în această direcție de studiu. Una dintre cele mai interesante probleme tehnice poate sau nu fi considerată ca ținând de psihologie. Problema centrală a minții, sau a sistemului nervos dacă vreți, este următoarea. Când un animal învață ceva, el poate face o treabă diferită față de ce putea face înainte. Celula creierului său trebuie să se fi modificat și ea, dacă este constituită din atomi. *În ce fel este ea diferită?* Nu știm unde să cercetăm sau ce să cercetăm pentru a ne da seama ce se întâmplă atunci când se memorizează ceva. Nu știm ce înseamnă faptul de a învăța ceva, ce schimbare intervine în sistemul nervos. E o problemă foarte importantă care nu a fost deloc rezolvată. Presupunând totuși că există un fel de mecanism al memoriei, creierul reprezintă o masă atât de mare de conexiuni și nervi, încât probabil că nu poate fi analizat într-un mod simplu. Există o analogie cu mașinile de calcul și elementele lor, în sensul că și acestea au o mulțime de conexiuni, precum și un element, analog poate cu sinapsa, care realizează legătura unui nerv cu altul. E un subiect foarte interesant pe care nu avem timpul să-l adâncim — legătura dintre gândire și mașinile de calcul. Trebuie remarcat însă că

acest subiect ne va spune foarte puțin despre complexitatea reală a comportamentului uman. Oamenii sunt atât de diferiți între ei. Va trece mult timp până să ajungem să înțelegem ce se întâmplă în mințile lor. Trebuie să începem de un nivel mult mai simplu. Dacă ne-am putea face măcar o idee despre cum funcționează un *câine*, am ajunge destul de departe. Câinii sunt mai ușor de înțeles decât oamenii, dar nimeni nu știe cum funcționează un câine.

## Cum a ajuns să fie așa?

Pentru ca fizica să fie utilă altor științe într-un mod *teoretic*, altfel decât prin inventarea instrumentelor, știința în chestiune trebuie să furnizeze fizicianului o descriere a obiectului său în limbajul fizicianului. Dacă fizicianului i se pune doar întrebarea „de ce sare o broască?“, el nu va putea răspunde. Dacă i se spune însă ce este o broască, câte molecule conține, că există un nerv aici și aici etc., lucrurile se schimbă. Dacă i se va spune cam cum sunt Pământul sau stelele, atunci el va putea începe să calculeze. Pentru ca teoria fizică să fie de vreun folos, trebuie să știm unde sunt așezați atomii. Pentru a înțelege chimia, trebuie să știm exact ce atomi sunt prezenți, căci altminteri nu putem analiza situația. Aceasta este desigur numai una dintre limitări.

Există un alt *fel* de problemă în științele-surori, care în fizică nu există; am putea-o numi, din lipsa unui termen mai bun, problema istorică. Cum a ajuns să fie așa? Dacă vom fi înțeles totul despre biologie, vom vrea să știm cum au ajuns în situația de azi toate ființele de pe Pământ. Există teoria evoluției, o parte importantă a biologiei. În geologie, nu vrem doar să știm cum se formează munții, ci și cum s-a format întreg Pământul, originea sistemului solar etc. Aceasta, desigur, ne conduce la a vrea să știm ce fel de materie există

în univers. Cum au evoluat stelele ? Care erau condițiile inițiale ? Aceasta este problema astronomiei istorice. S-au stabilit o mulțime de lucruri despre formarea stelelor, formarea elementelor din care suntem alcătuiți, și chiar câte ceva despre originea universului.

Nu există nici o întrebare istorică pusă în acest moment în studiile de fizică. Nu ne punem întrebarea: „Iată legile fizicii, cum au ajuns ele să fie așa ?" Nu ne imaginăm în prezent că legile fizicii s-ar schimba cumva cu timpul, că ele ar fi fost diferite în trecut de ceea ce sunt în prezent. Desigur, ele *ar putea* fi diferite, iar în momentul când vom afla că așa *sunt*, problema istorică a fizicii va fi legată de restul istoriei universului. Atunci fizicienii vor studia aceleași probleme ca și astronomii, geologii, biologii.*

În fine, există o problemă fizică comună multor altor domenii, foarte veche, și care nu a fost rezolvată. Nu e vorba de găsirea de noi particule fundamentale, ci de o problemă amânată de multă vreme, de peste o sută de ani. Nimeni în fizică nu a fost într-adevăr în stare s-o analizeze matematic în mod satisfăcător, în ciuda importanței sale pentru științele-surori. Este vorba de analiza *fluidelor în circulație* sau *turbulente*. Dacă urmărim evoluția unei stele, vine un moment când putem prevedea că va începe convecția, iar apoi nu mai putem prevedea ce trebuie să se întâmple. Câteva milioane de ani mai târziu steaua explodează, dar nu putem descoperi motivul. Nu suntem în stare să analizăm vremea. Nu cunoaștem tipurile de mișcări existente în interiorul Pământului. Iată cea mai simplă formă a problemei: se consideră o conductă foarte lungă și se trimite apă prin ea cu mare viteză. Se pune întrebarea: ce presiune e necesară pentru a

* Afirmațiile lui Feynman din acest paragraf se cer nuanțate. Ultimele decenii au pus în evidență o legătură profundă între fizica fundamentală și cosmologie (istoria universului). (*N. red.*)

trimite o cantitate de apă prin acea conductă? Nimeni nu poate face o analiză pornind de la legile fundamentale ale fizicii și de la proprietățile apei. Dacă apa curge foarte încet, sau dacă folosim o pastă groasă ca mierea, analiza poate fi făcută cu precizie. O veți găsi în manualele dumneavoastră. Ceea ce nu putem face însă este să ne ocupăm de apă adevărată, lichidă, circulând repede printr-o conductă. Aceasta este o problemă centrală pe care va trebui s-o rezolvăm într-o bună zi.

Un poet a spus odată: „întregul univers este cuprins într-un pahar de vin." Nu vom ști probabil niciodată ce a vrut să spună prin asta, fiindcă poeții nu scriu pentru a fi înțeleși. Dar e adevărat că dacă privim un pahar de vin cu atenție vom vedea întregul univers. Există acolo obiecte ce țin de fizică: lichidul care se răsucește și se evaporă în funcție de vânt și de vreme, reflexiile pe sticlă, iar imaginația noastră adaugă atomii. Sticla este o distilare a rocilor pământului și în compoziția sa vedem secretele vârstei universului și evoluția stelelor. Ce rețea ciudată de chimicale se află în vin? Cum au ajuns acolo? Iată fermenții, enzimele și produsele lor. Acolo, în vin, se află marea generalizare: întreaga viață este fermentație. Nimeni nu poate descoperi chimia vinului fără a descoperi, așa cum a făcut Louis Pasteur, cauza multor boli. Cât de strălucitor este vinul rubiniu și cum își impune existența asupra conștiinței care îl observă! Dacă mințile noastre limitate, pentru a simplifica lucrurile, împart acest pahar de vin, acest univers, în părți — fizică, biologie, geologie, astronomie, psihologie și așa mai departe — amintiți-vă că natura nu cunoaște așa ceva! Așa că haideți să punem totul la un loc și să nu uităm la ce servește paharul în cele din urmă. Fie ca el să ne mai dăruiască o ultimă plăcere: să-l bem și să uităm de toate!

# 4
# Conservarea energiei

## Ce este energia ?

În acest capitol începem studiul nostru mai detaliat asupra diferitelor aspecte ale fizicii, odată ce am încheiat descrierea lucrurilor în general. Pentru a ilustra ideile și felul de a raționa din fizica teoretică, vom examina acum una din legile fundamentale ale fizicii — conservarea energiei.

Există un fapt, sau, dacă vreți o *lege*, care guvernează toate fenomenele naturale cunoscute până acum. Nu se cunoaște vreo excepție de la această lege — după câte știm, ea e exactă. Legea se numește *conservarea energiei*. Ea afirmă că există o anumită cantitate, numită energie, care nu se schimbă în multiplele transformări pe care le suferă natura. E o idee foarte abstractă, fiindcă e un principiu matematic; ea afirmă că există o cantitate numerică neschimbată când se întâmplă ceva. Nu e descrierea vreunui mecanism sau a ceva concret; este doar faptul straniu că avem posibilitatea să calculăm un număr și, după ce am terminat de observat natura făcându-și scamatoriile, calculăm numărul din nou — el e același. (Ceva asemănător cu nebunul de pe un pătrat negru, care după un număr de mutări — detaliile necunoscute — rămâne tot pe un pătrat negru. E o lege a naturii.) Din moment ce e o idee abstractă, vom ilustra semnificația ei printr-o analogie.

Închipuiţi-vă un copil, să-i zicem Dan, care are nişte cuburi absolut indestructibile ce nu pot fi împărţite în bucăţi. Fiecare e la fel cu celălalt. Să presupunem că are 28 de cuburi. La începutul zilei, mama lui îl lasă cu cele 28 de cuburi într-o cameră. La sfârşitul zilei, din curiozitate, ea numără cuburile cu atenţie şi descoperă o lege fenomenală — indiferent ce face copilul cu cuburile, ele rămân întotdeauna 28! Aceasta durează un număr de zile, până când într-o bună zi sunt numai 27 de cuburi, dar o mică cercetare arată că unul se află sub cuvertură — ea trebuie să se uite peste tot ca să fie sigură că numărul cuburilor nu s-a modificat. Într-o zi totuşi numărul pare să se fi schimbat — sunt numai 26 de cuburi. O cercetare atentă arată că fereastra era deschisă şi, privind afară, sunt găsite celelalte două cuburi. În altă zi, o numărătoare atentă arată că sunt 30 de cuburi! Faptul provoacă o mare uimire, dar până la urmă mama îşi dă seama că fusese în vizită George care şi-a adus cuburile cu el şi a lăsat câteva acasă la Dan. După ce a înlăturat cuburile suplimentare, ea închide fereastra, nu-i mai dă voie lui George înăuntru, iar apoi totul merge strună, până când la un moment dat ea numără şi găseşte numai 25 de cuburi. În cameră este însă o cutie cu jucării şi mama se duce să deschidă această cutie, dar băiatul îi spune „Nu, nu-mi deschide cutia cu jucării" şi începe să ţipe. Mama nu are voie să deschidă cutia cu jucării. Fiind extrem de curioasă şi destul de ingenioasă, ea imaginează un plan! Ştie că un cub cântăreşte 100 grame şi cântăreşte cutia într-un moment când sunt pe jos, la vedere, 28 de cuburi, constatând că are 1 kg. Data următoare când doreşte să controleze, cântăreşte cutia din nou, scade 1 kg şi împarte la trei. Ea descoperă următoarea relaţie:

$$\begin{matrix}\text{numărul de cuburi}\\ \text{la vedere}\end{matrix} + \frac{(\text{greutatea cutiei}) - 1\text{ kg}}{0{,}1\text{ kg}} = \text{constant} \quad (4.1)$$

Apar apoi noi abateri, dar un studiu atent arată că apa murdară din cada de la baie își schimbă nivelul. Copilul aruncă cuburi în apă, iar mama nu poate să le vadă fiindcă apa e murdară, dar poate afla câte cuburi sunt în apă adăugând un alt termen la formula ei. Cum înălțimea inițială a apei era de 10 cm, iar fiecare cub ridică apa cu o jumătate de centimetru, această nouă formă va fi:

$$\text{numărul de cuburi la vedere} + \frac{(\text{greutatea cutiei}) - 1\ \text{kg}}{0{,}1\ \text{kg}} + \frac{(\text{înălțimea apei}) - 10\ \text{cm}}{1/2\ \text{cm}} = \text{constant.} \quad (4.2)$$

În continua creștere a complexității lumii ei, mama găsește o întreagă serie de termeni reprezentând modul de a calcula câte cuburi se află în locuri unde nu are acces. Ca rezultat, ea găsește o formulă complexă pentru o cantitate ce *trebuie calculată*, cantitate care rămâne întotdeauna aceeași.

Ce analogie există între situația descrisă și conservarea energiei ? Cel mai important aspect care trebuie înțeles din această imagine este că, de fapt, *nu există cuburi.* Lăsați la o parte primii termeni din (4.1) și (4.2) și iată-ne calculând lucruri mai mult sau mai puțin abstracte. Analogia e valabilă în următoarele puncte. În primul rând, când calculăm energia, uneori o parte din ea părăsește sistemul, iar alteori o parte din ea sosește. Ca să verificăm conservarea energiei, trebuie să fim atenți să nu fi adăugat sau să nu fi pierdut ceva din ea. În al doilea rând, energia are un mare număr de *forme diferite*, și există o formulă pentru fiecare. Acestea sunt: energia gravitațională, energia cinetică, energia calorică, energia elastică, energia electrică, energia chimică, energia radiantă, energia nucleară, energia masei. Dacă însumăm formulele pentru fiecare din aceste contribuții, rezultatul va rămâne neschimbat, abstracție făcând de energia care vine și pleacă.

E important să înţelegem că fizica zilelor noastre nu ne spune de fapt ce *este* energia. Nu ne reprezentăm energia sosind în mici picături ce conţin o cantitate bine definită. Nu aşa stau lucrurile. Există însă formule pentru a calcula o anumită cantitate numerică, iar când le însumăm pe toate obţinem „28" — de fiecare dată acelaşi număr. Acesta e un lucru abstract în sensul că nu ne spune nimic despre mecanismul sau *raţiunea* diverselor formule.

## Energia potenţială gravitaţională

Conservarea energiei poate fi înţeleasă numai dacă avem formule pentru toate formele ei. Vreau acum să analizez formula pentru energia gravitaţională aproape de suprafaţa Pământului şi să deduc această formulă într-un mod care nu are nimic de-a face cu istoria, ci e pur şi simplu un raţionament inventat anume pentru această lecţie, spre a vă da o ilustrare a faptului remarcabil că despre natură se poate extrage mult din câteva fapte şi un raţionament riguros. Este o ilustrare a modului de lucru din fizica teoretică şi mi-a fost sugerată de un excelent raţionament al domnului Carnot privind randamentul maşinilor cu abur.*

Să considerăm maşinile de ridicat — maşini care au proprietatea că ridică o greutate coborând o alta. Să facem o ipoteză: la aceste maşini de ridicat *nu există mişcarea perpetuă*. (De fapt, inexistenţa vreunui fel de mişcare perpetuă este un enunţ general al legii conservării energiei.) Trebuie să fim atenţi cum definim mişcarea perpetuă. Pentru început, s-o facem în cazul maşinilor de ridicat. Dacă, după ce am ridicat şi coborât o mulţime de greutăţi şi am

---

* Scopul nostru aici este nu atât rezultatul (4.3), pe care de fapt poate că îl cunoaşteţi deja, cât posibilitatea de a ajunge la el printr-un raţionament teoretic. (*N. a.*)

readus mașina în situația inițială, găsim că rezultatul net este că am *ridicat o greutate*, atunci avem de-a face cu o mașină cu mișcare perpetuă, fiindcă putem folosi greutatea ridicată pentru a pune în mișcare altceva. Condițiile impuse sunt deci ca mașina care a ridicat greutatea să revină *exact* în situația sa inițială și, în plus, să fie complet *izolată* — nu a primit energia pentru a ridica acea greutate de la vreo sursă exterioară (amintiți-vă de cazul cuburilor lui George).

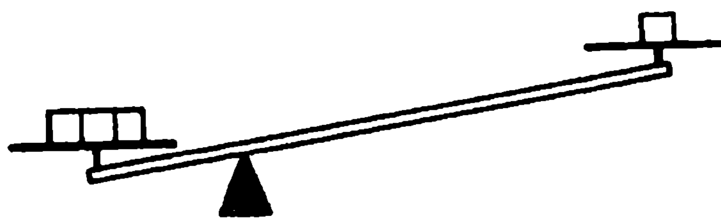


*Fig. 4.1.* Mașină simplă de ridicat

O mașină de ridicat foarte simplă e prezentată în figura 4.1. Această mașină ridică greutăți triple față de cele folosite. Așezăm trei greutăți pe un taler și o unitate pe celălalt. Dar, pentru a o face într-adevăr să funcționeze, trebuie să ridicăm o mică greutate de pe talerul stâng. Pe de altă parte, am putea ridica o greutate de o unitate coborând greutatea de trei unități, dacă trișăm puțin și ridicăm o mică greutate de pe celălalt taler. Desigur, ne dăm seama că la orice mașină de ridicat *reală* trebuie să adăugăm ceva pentru a o face să funcționeze. *Pentru moment* însă, trecem peste acest aspect. Mașinile ideale, deși așa ceva nu există, nu cer nimic în plus. O mașină pe care o folosim în realitate poate fi, într-un anume sens, *aproape* reversibilă: dacă va ridica greutatea de trei coborând greutatea de unu, atunci, de asemenea, ea aproape că va ridica greutatea de unu, coborând greutatea de trei.

Ne imaginăm că există două clase de mașini: cele care *nu* sunt reversibile, incluzând aici toate mașinile reale, și cele care *sunt* reversibile și care, desigur, nu se pot construi în realitate, oricât de atenți am fi la proiectarea lagărelor, pârghiilor

etc. Să presupunem totuşi că ar exista un astfel de lucru — o maşină reversibilă — care coboară o unitate de greutate (un kilogram sau orice altă unitate) cu o unitate de distanţă şi în acelaşi timp ridică o greutate de trei unităţi. Să numim această maşină reversibilă Maşina *A*. Să presupunem că această maşină reversibilă ridică greutatea de trei unităţi cu o distanţă *X*. Să presupunem apoi că avem altă maşină, Maşina *B*, care nu e în mod necesar reversibilă, şi care coboară de asemenea o unitate de greutate cu o unitate de distanţă, dar care ridică trei unităţi cu o distanţă *Y*. Putem demonstra acum că *Y* nu e mai mare decât *X*, adică este imposibil să se construiască o maşină care să ridice o greutate cu *oricât de puţin mai sus* decât ar fi ridicată de o maşină reversibilă. Să vedem de ce. Să presupunem că *Y* ar fi mai mare decât *X*. Luăm o unitate de greutate şi o coborâm cu o unitate de înălţime cu Maşina *B*, şi aceasta ridică greutatea de trei unităţi cu o distanţă *Y*. După aceea am putea coborî greutatea de la *Y* la *X*, *obţinând gratuit putere*, şi folosi apoi Maşina reversibilă *A*, funcţionând în sens invers, pentru a coborî greutatea de trei unităţi cu distanţa X şi a ridica greutatea de o unitate cu o unitate de înălţime. Aceasta ar pune greutatea de o unitate înapoi unde era înainte şi ar lăsa ambele maşini gata pentru a fi folosite din nou! Am avea deci mişcare perpetuă dacă *Y* ar fi mai mare decât *X*, ceea ce am presupus că e imposibil. Cu aceste presupuneri, deducem astfel că *Y nu e mai mare decât* X, aşa încât dintre toate maşinile care pot fi proiectate, maşina reversibilă e cea mai bună.

Putem de asemenea vedea că toate maşinile reversibile trebuie să ridice la *exact aceeaşi înălţime*. Închipuiţi-vă că *B* ar fi de asemenea reversibilă. Argumentul că *Y* nu-i mai mare decât *X* este, desigur, la fel de bun ca şi înainte, dar putem inversa argumentarea, folosind maşinile în ordine inversă, şi demonstra că *X nu e mai mare decât Y*. Aceasta este o observaţie remarcabilă fiindcă ne permite să analizăm

înălțimea la care vor ridica ceva diferitele mașini, *fără să considerăm mecanismul lor interior.* Știm imediat că dacă cineva face o serie de pârghii extrem de minuțios executate, care ridică trei unități cu o anumită distanță coborând o unitate cu o unitate distanță, și o comparăm cu o pârghie simplă care face același lucru și este fundamental reversibilă, mașina lui nu va ridica mai sus, ci, poate, ceva mai jos. Dacă mașina lui este reversibilă, atunci știm de asemenea exact *cât* de sus va ridica. Pentru a rezuma: orice mașină reversibilă, indiferent cum funcționează, care coboară un kilogram cu un metru și ridică o greutate de trei kilograme, va ridica această greutate întotdeauna cu aceeași distanță $X$. Aceasta este în mod clar o lege universală extrem de utilă. Următoarea întrebare care se pune, desigur, este: ce valoare are $X$?

Închipuiți-vă că avem o mașină reversibilă care să ridice cu această distanță $X$ o greutate de 3 kg, coborând cu un metru o greutate de 1 kg. Punem trei bile într-un rastel fix, ca în figura 4.2. A patra bilă este ținută pe un suport la o distanță de un metru deasupra podelei. Mașina noastră poate ridica trei bile coborând una cu distanța de 1 m. Să considerăm și o platformă mobilă care poate primi cele trei bile în trei compartimente de înălțime $X$. Presupunem de asemenea că înălțimea rafturilor rastelului care ține bilele este tot $X$ (vezi situația (a)). Întâi rostogolim bilele orizontal din rastel în compartimentele platformei mobile (situația (b)), presupunând că asta nu cere energie fiindcă nu le schimbă înălțimea. Apoi mașina reversibilă intră în acțiune: ea coboară bila izolată pe podea și ridică platforma mobilă cu o distanță $X$ (situația (c)). Rastelul a fost în mod ingenios aranjat astfel încât bilele sunt din nou în dreptul polițelor sale. Descărcăm bilele în rastel (d). După aceeea putem readuce mașina în starea ei inițială. Într-adevăr, acum avem trei bile pe cele trei polițe superioare și a patra pe podea. Dar lucrul ciudat este că, într-un anumit sens, nu am ridicat *două* dintre ele deloc,

fiindcă, în definitiv, existau și înainte bile pe polițele 2 și 3. Efectul final a fost să se ridice *o bilă* cu distanța $3X$. Acum, dacă $3X$ depășește 1 m, putem coborî bila pentru a readuce mașina în starea inițială (f) și putem pune iarăși în funcțiune aparatul. Așadar $3X$ nu poate depăși 1 m, căci dacă depășește 1 m putem face mișcare perpetuă. La fel, putem demonstra că 1 m *nu poate depăși* $3X$, făcând întreaga mașină să funcționeze în sens invers, întrucât este o mașină reversibilă.

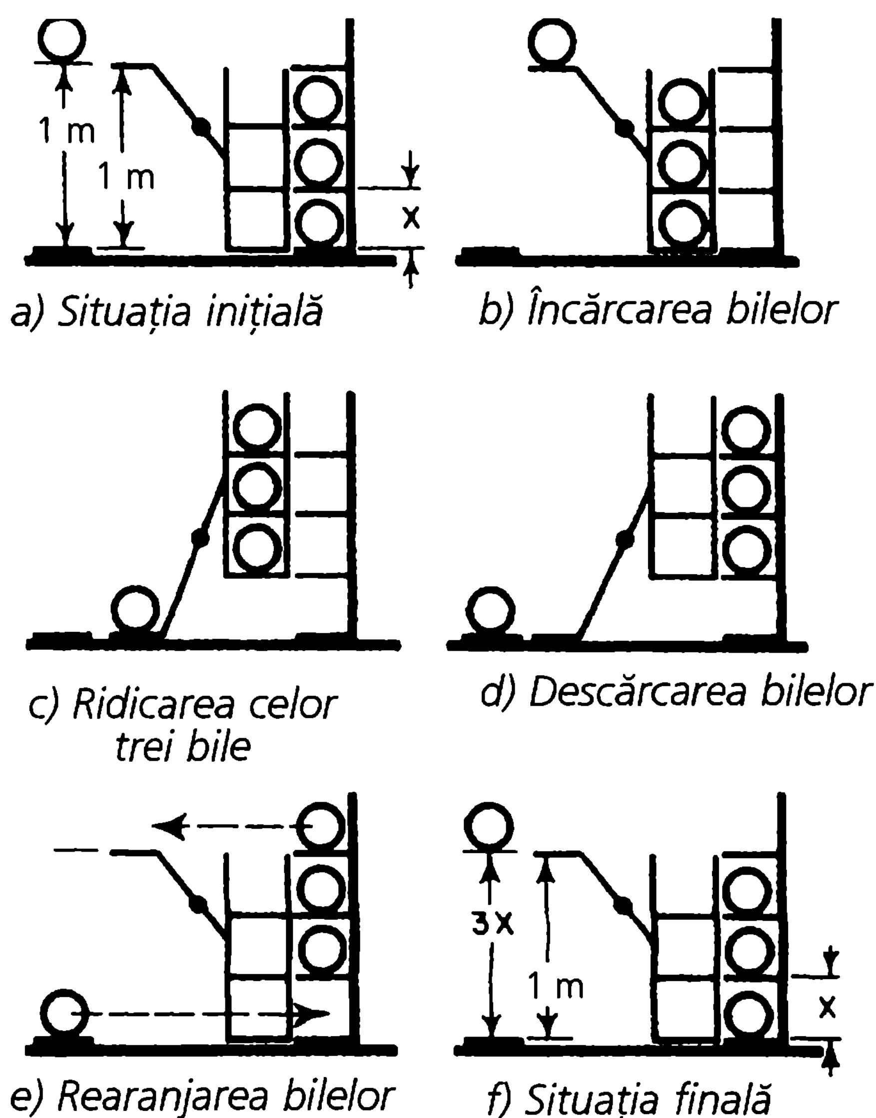



*Fig. 4.2.* O mașină reversibilă

Așadar $3X$ nu este nici mai mare, nici mai mic decât 1 m, și descoperim atunci, numai prin raționament, legea: $X = 1/3$ m. Generalizarea este clară: un kilogram cade o anumită distanță, punând în funcțiune o mașină reversibilă; atunci mașina poate ridica $p$ kg cu această distanță împărțită la $p$. Alt mod de a prezenta rezultatul este că 3 kg ori înălțimea ridicată, care în problema noastră era $X$, este egal cu 1 kg ori

distanța coborâtă, care este 1 m în acest caz. Dacă luăm toate greutățile și le înmulțim cu înălțimile la care se află ele acum deasupra podelei, lăsăm mașina să funcționeze, iar apoi înmulțim din nou toate greutățile cu toate înălțimile, *nu va surveni nici o schimbare*. (Trebuie să generalizăm exemplul precedent în care mișcăm numai o greutate, trecând la cazul în care, atunci când coborâm una, ridicăm mai multe; aceasta este însă ușor.)

Numim suma greutăților înmulțită cu înălțimile lor *energie potențială gravitațională* — energia pe care o are față de Pământ un obiect datorită poziției sale în spațiu. Formula pentru energia gravitațională, atâta vreme cât nu ne aflăm prea departe de Pământ (forța slăbește când mergem în sus) este deci

$$\begin{pmatrix}\text{energia potențială}\\ \text{gravitațională}\\ \text{pentru un obiect}\end{pmatrix} = (\text{greutatea}) \times (\text{înălțimea}) \qquad (4.3)$$

Iată o cale de raționament foarte frumoasă! Singura problemă e că s-ar putea să nu fie adevărată. (În definitiv, natura nu trebuie să fie de acord cu raționamentul nostru.) De exemplu, poate că mișcarea perpetuă este în realitate posibilă. Unele dintre presupuneri pot fi greșite, sau am putut face o greșală în raționament, astfel că e întotdeauna necesar să verificăm. *Se dovedește experimental* că într-adevăr concluzia e corectă.

Numele generic al energiei care are de-a face cu așezarea relativă a ceva față de altceva este energie *potențială*. În cazul particular discutat, o numim desigur *energie potențială gravitațională*. Dacă în loc de forțe gravitaționale avem de-a face cu forțe electrice împotriva cărora lucrăm, folosind o mulțime de pârghii, pentru a „ridica“ sarcini în raport cu alte sarcini, atunci conținutul de energie se numește *energie potențială*

*electrică.* Principiul general spune că variaţia energiei reprezintă forţa ori distanţa pe care acţionează forţa

$$\begin{pmatrix}\text{variaţia}\\ \text{energiei}\end{pmatrix} = (\text{forţat}) \times \begin{pmatrix}\text{distanţa pe care se}\\ \text{deplasează forţa}\end{pmatrix} \qquad (4.4)$$

Vom discuta multe alte feluri de energie pe măsură ce cursul nostru va înainta.

Principiul conservării energiei e foarte util pentru a prevedea ce se va întâmpla în diferite împrejurări. În liceu am învăţat o mulţime de legi despre pârghii şi scripeţi folosiţi în diverse moduri. Putem vedea acum că aceste „legi“ sunt *toate unul şi acelaşi lucru* şi că nu trebuie să ţinem minte 75 de reguli pentru a face calcule. Un exemplu simplu este planul înclinat neted, care, într-o alegere fericită formează un triunghi cu laturile de dimensiuni trei–patru–cinci (fig. 4.3). Atârnăm, cu ajutorul unui scripete, o greutate de 1 kg pe planul înclinat, iar de cealaltă parte a scripetului punem o greutate *W*. Vrem să ştim cât de mare trebuie să fie *W* ca să echilibreze kilogramul de pe plan. Cum putem calcula asta ? Dacă greutatea *W* este perfect echilibrată, ea poate fi mişcată în sus şi în jos în mod reversibil. Să procedăm în felul următor. În situaţia iniţială (a), greutatea de 1 kg este jos, iar greutatea *W* e sus. Când *W* a alunecat jos în mod reversibil, avem o greutate de 1 kg sus şi greutatea *W* la o distanţă egală cu lungimea ipotenuzei, adică 5 m, de planul orizontal în care se afla la început (situaţia (b)). Am ridicat greutatea de 1 kg cu numai 3 m şi am coborât *W* kg cu 5 m. Aşadar $W = 3/5$ kg.

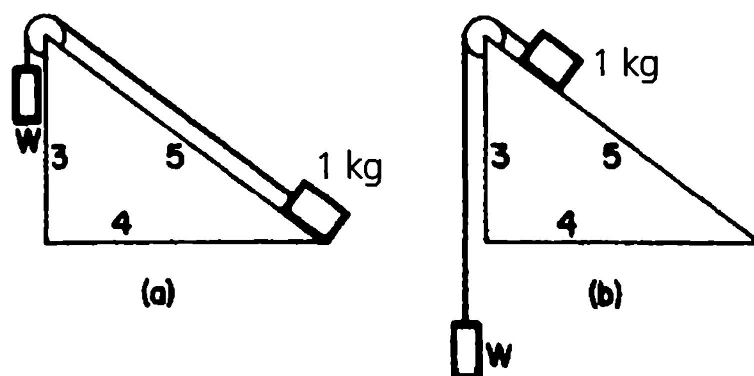



*Fig. 4.3.* Plan înclinat

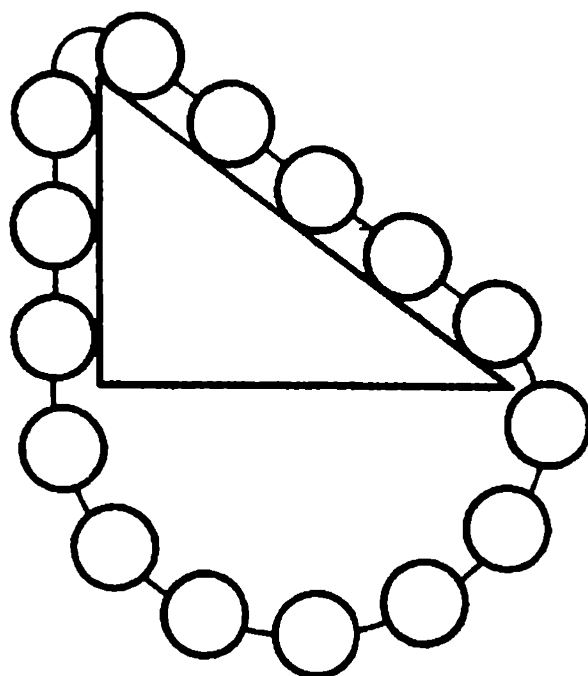


*Fig. 4.4.* Epitaful lui Stevin

Observați că am dedus acest lucru din *conservarea energiei* și nu considerând componentele forțelor. Dar ingeniozitatea este relativă. Într-adevăr, faptul poate fi dedus într-un mod și mai elegant, descoperit de Stevin și înscris pe piatra sa funerară. Figura 4.4 explică de ce rezultatul trebuie să fie 3/5 kg, datorită faptului că lanțul nu se învârtește. Este evident că partea inferioară a lanțului este echilibrată de ea însăși, astfel încât tracțiunea celor cinci greutăți de o parte trebuie să echilibreze tracțiunea celor trei greutăți de cealaltă parte, raportul fiind egal cu raportul laturilor. Vedeți, așadar, privind la această figură, că *W* trebuie să fie 3/5 kg. (Dacă vă alegeți cu un epitaf ca acesta pe piatra de mormânt înseamnă că v-ați descurcat bine!)

Să ilustrăm acum principiul energiei cu o problemă mai complicată, cricul cu șurub din figura 4.5. Un mâner lung de 1 m este folosit pentru a învârti șurubul, care are pasul

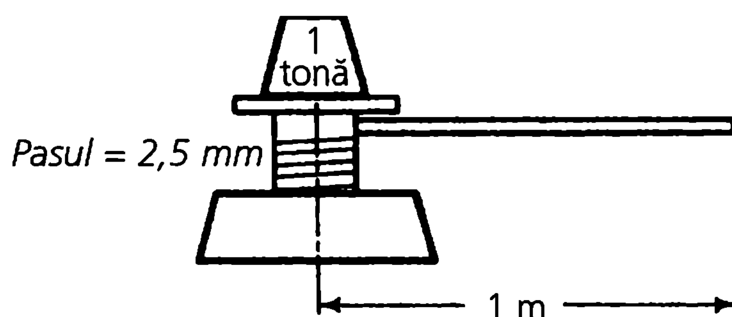



*Fig. 4.5.* Un cric cu șurub

de 2,5 mm. Am vrea să ştim câtă forţă e necesară la mâner pentru a ridica o tonă. Dacă vrem să ridicăm tona cu 1 cm, să zicem, trebuie să învârtim mânerul de patru ori. Când se învârte o dată, el parcurge aproximativ 6,28 m (adică $2 \pi r$). Mânerul trebuie aşadar să parcurgă în total 25,12 m. Dacă am fi folosit diverşi scripeţi etc., am fi ridicat tona noastră cu o greutate mai mică *W* aplicată la capătul mânerului. Ca rezultat al conservării energiei, găsim că *W* este de circa 0,4 kg.

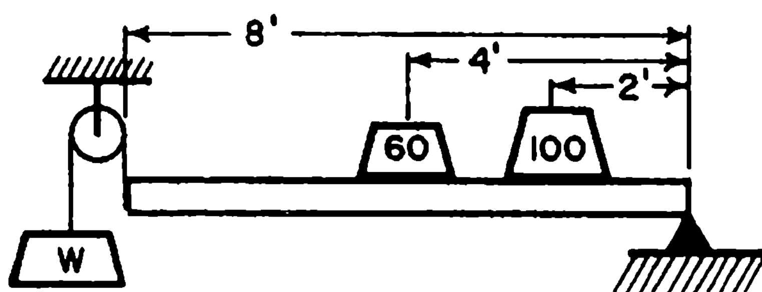



*Fig. 4.6.* Bară încărcată sprijinită la un capăt

Să luăm acum exemplul ceva mai complicat prezentat în figura 4.6. O bară de 8 m lungime este sprijinită la un capăt. La mijlocul barei se află o greutate de 60 kg, iar la o distanţă de 2 m de punctul de sprijin există o greutate de 100 kg. Cât de tare trebuie să ridicăm capătul barei pentru a o ţine în echilibru, neglijându-i greutatea? Închipuiţi-vă că punem un scripete la un capăt şi atârnăm o greutate de acest scripete. Cât de mare ar trebui să fie greutatea *W* pentru a fi în echilibru? Să ne imaginăm că *W* cade cu o distanţă oarecare — de exemplu 4 cm; cât de sus s-ar ridica cele două greutăţi de încărcare? Centrul se ridică cu 2 cm, iar punctul situat la un sfert de drum de la capătul fix se ridică cu 1 cm. Aşadar principiul că suma înălţimilor ori greutăţile nu se schimbă ne spune că greutatea *W* ori 4 cm în jos, plus 60 kg ori 2 cm în sus, plus 100 kg ori 1 cm în sus trebuie să facă în total zero:

$$-4W + 2 \times 60 + 1 \times 100 = 0, \text{ de unde } W = 55 \text{ kg}. \quad (4.5)$$

Trebuie deci să avem o greutate de 55 kg ca să echilibrăm bara. În acest mod putem găsi legile „echilibrului“ — statica unor structuri complicate de poduri și așa mai departe. Acest procedeu se numește *principiul lucrului virtual*, fiindcă pentru a-l aplica a trebuit să ne *imaginăm* că structura se deplasează puțin — deși nu este cu adevărat în mișcare sau nici măcar *mobilă*. Utilizăm foarte mica deplasare imaginată pentru a aplica principiul conservării energiei.

## Energia cinetică

Pentru a ilustra alt tip de energie, să considerăm un pendul (fig. 4.7). Dacă tragem greutatea într-o parte și îi dăm drumul, ea oscilează încoace și încolo. În mișcarea sa, pierde înălțime plecând de la unul din cele două capete spre centru. Unde se duce energia ei potențială? Energia gravitațională dispare când greutatea se află în partea de jos a traiectoriei, și totuși greutatea va urca din nou. Energia gravitațională trebuie să fi trecut într-o altă formă. Evident că grație *mișcării* greutatea poate urca din nou, astfel încât avem de-a face cu conversia energiei gravitaționale într-o altă formă de energie când greutatea ajunge în partea de jos.

Trebuie să obținem o formulă pentru energia mișcării. Or, reamintindu-ne argumentele noastre despre mașinile reversibile, putem vedea ușor că în mișcarea din partea de jos a traiectoriei trebuie să existe o cantitate de energie care permite pendulului să se ridice la o anumită înălțime; aceasta

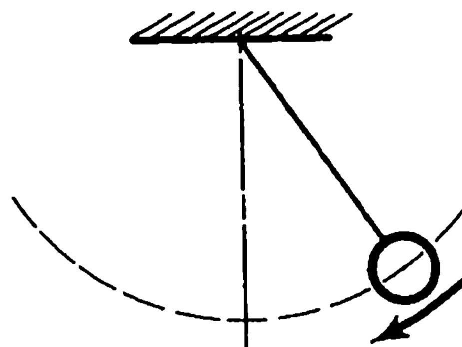


*Fig. 4.7.* Pendul

nu are nimic de-a face cu *mecanismul* care-l face să meargă în sus sau cu *drumul* pe care merge în sus. Aşadar, avem o formulă de echivalenţă, cam la fel cu cea pe care am scris-o pentru cuburile copilului. Avem o altă formă de a exprima energia. E uşor de spus care e aceasta. Energia cinetică a pendulului în partea de jos a traiectoriei este egală cu greutatea ori înălţimea la care ar putea el să se ridice, ţinând seama de viteza sa: energia cinetică = $WH$. Ne trebuie o formulă care să ne dea înălţimea $H$ printr-o regulă dedusă din mişcarea corpurilor. Dacă punem în mişcare un corp cu o anumită viteză, să zicem drept în sus, el va atinge o anumită înălţime; încă nu ştim care este aceasta, dar ştim că depinde de viteză — există o formulă pentru asta. Apoi, pentru a găsi formula energiei cinetice a unui obiect mişcându-se cu viteza $V$, trebuie să calculăm înălţimea pe care ar putea-o atinge şi să o înmulţim cu greutatea. Vom vedea în curând că putem scrie:

$$E_{cin} = WV^2/2g. \tag{4.6}$$

Desigur, faptul că mişcarea are energie n-are legătură cu faptul că ne aflăm într-un câmp gravitaţional. Nu contează *de unde* provine mişcarea. Aceasta este o formulă generală, valabilă pentru viteze diferite. Atât (4.3), cât şi (4.6) sunt însă aproximative, prima fiindcă e incorectă când înălţimile sunt mari, adică atunci când înălţimile sunt atât de mari încât gravitaţia slăbeşte, iar a doua din cauza corecţiei relativiste la viteze mari. Totuşi, când în cele din urmă vom obţine formule exacte pentru energie, legea conservării energiei va fi respectată.

## ALTE FORME DE ENERGIE

Putem continua în acest fel să ilustrăm existenţa energiei sub alte forme. Să începem cu energia elastică. Dacă tragem

un resort, trebuie să efectuăm un lucru, pentru că atunci când este tras în jos putem ridica cu el greutăți. Deci, când e întins, resortul are posibilitatea să efectueze lucru mecanic. Dacă ar fi să evaluăm sumele greutăților înmulțite cu înălțimile, nu nu ne-ar ieși socoteala — trebuie să adăugăm ceva pentru a ține seama de faptul că resortul este tensionat. Energia elastică reprezintă formula corespunzătoare pentru un resort aflat în stare de întindere. Cât de mare este energia? Dacă îi dăm drumul, în timp ce resortul trece prin punctul de echilibru energia elastică este convertită în energie cinetică. Transformarea aceasta în energie cinetică a mișcării are loc mereu la strângerea sau întinderea resortului. (Există de asemenea puțină energie gravitațională câștigată și pierdută, dar putem face abstracție de ea, dacă vrem.) Resortul continuă să se miște până când pierderile... Aha! Am trișat mereu, punând mici greutăți ca să facem să se miște obiectele sau spunând că mașinile sunt reversibile, sau că ele funcționează veșnic, dar ne dăm seama că lucrurile se opresc în cele din urmă. Unde este energia când resortul a încetat să se miște în sus și în jos? Răspunsul introduce o *altă* formă de energie: *energia calorică.*

Un resort sau o pârghie sunt făcute din cristale, care, la rândul lor, se compun dintr-o mulțime de atomi și, procedând cu multă grijă și finețe în aranjarea angrenajelor, se poate încerca să se ajusteze lucrurile astfel încât în timp ce o parte se rotește pe alta, nici unul dintre atomi să nu se zdruncine. Dar trebuie să fim foarte atenți. De obicei, când obiectele se rotesc, apar izbituri și șocuri din cauza neregularităților materialului, iar atomii încep să vibreze înăuntru. Astfel, pierdem urma acestei energii; găsim că atomii se agită înăuntru, într-un mod întâmplător și dezordonat, după ce mișcarea a încetat. Mai e energie cinetică, totul e în regulă, dar această energie nu e asociată cu o mișcare vizibilă. Nu e un vis? De unde *știm* că mai există energie

cinetică ? Se poate arăta cu ajutorul unui termometru că resortul sau pârghia sunt *mai calde* și că există într-adevăr o creștere a energiei cinetice interne cu o cantitate bine definită. Numim această formă de energie *energie calorică*, dar știm acum că ea nu-i o formă cu adevărat nouă, ci doar energie cinetică a mișcării interne. (Una din dificultățile tuturor acestor experiențe efectuate la scară macroscopică este că nu putem demonstra cu adevărat conservarea energiei și nu putem construi în realitate mașinile noastre reversibile pentru că, de fiecare dată când mișcăm o bucată mare de materie, atomii nu rămân absolut nederanjați, iar astfel o anumită cantitate de mișcare dezordonată trece în sistemul atomic. N-o putem vedea, dar o putem măsura cu termometre etc.)

Există multe alte forme de energie și, desigur, nu le putem descrie deocamdată mai în detaliu. Astfel, există energie electrică, care ține de atracția și respingerea dintre sarcinile electrice. Există energie radiantă, energia luminoasă despre care știm că e o formă de energie electrică, fiindcă lumina poate fi reprezentată ca vibrații ale câmpului electromagnetic. Există energia chimică — energia eliberată în reacții chimice. De fapt, energia elastică este, într-o oarecare măsură, asemănătoare cu energia chimică, deoarece ultima reprezintă energia atracției dintre atomi, ceea ce este valabil și pentru energia elastică. Maniera noastră modernă de a înțelege faptele e următoarea: energia chimică are două părți — energie cinetică a electronilor dinăuntrul atomilor (așadar, o parte din ea e energie cinetică) și energie electrică a interacției dintre electroni și protoni (restul este deci energie electrică). Ajungem apoi la energia nucleară, energia legată de aranjarea particulelor înăuntrul nucleului, și avem formule pentru asta, dar nu avem legile fundamentale. Știm că această energie nu e electrică, nu e gravitațională și nu e pur chimică, dar nu știm de ce natură este. Pare

a fi o formă nouă de energie. În sfârșit, asociată cu teoria relativității, există o modificare a legilor energiei cinetice sau cum vreți s-o numiți, astfel încât aceasta e combinată cu altceva numit *energia masei.* Un obiect are energie prin propria sa *existență*. Dacă avem un pozitron și un electron stând liniștiți în repaus — ignorăm gravitația și orice altceva — care se reunesc și dispar, va fi eliberată energie radiantă într-o cantitate determinată, ce poate fi calculată. Tot ce trebuie să știm este masa obiectului. Energia masei nu depinde de natura obiectului — facem ca două obiecte să se anihileze și căpătăm o anumită cantitate de energie. Formula acestei energii a fost găsită pentru prima dată de Einstein; ea este $E = mc^2$.

Din discuția noastră rezultă limpede că legea conservării energiei se dovedește formidabil de utilă în raționamentele pe care le facem, așa cum am ilustrat prin câteva exemple, fără a cunoaște toate formulele. Dacă am avea toate formulele, pentru toate felurile de energie, am putea stabili cât de multe procese ar putea avea loc, fără a trebui să intrăm în detalii. Așadar, legile de conservare sunt foarte interesante. Apare în mod natural întrebarea: ce alte legi de conservare există în fizică? Există două alte legi de conservare care sunt analoge conservării energiei. Una se numește conservarea impulsului. Cealaltă se numește conservarea momentului cinetic. Vom afla mai multe despre acestea ceva mai târziu. În ultimă instanță, nu înțelegem legile de conservare în profunzime. Nu înțelegem conservarea energiei. Nu înțelegem de ce energia apare ca un anumit număr de mici porții. Poate ați auzit că fotonii apar în porții și că energia unui foton este constanta lui Planck înmulțită cu frecvența. E un lucru adevărat, dar întrucât frecvența luminii poate lua orice valoare, nu există o lege care să spună că energia trebuie să aibă o anumită valoare bine definită. Spre deosebire de cuburile lui Dan, poate să existe orice cantitate

de energie, cel puţin după cât se cunoaşte în prezent. Aşa încât nu înţelegem deocamdată această energie ca reprezentând ceva anume, ci doar ca pe o mărime matematică, ceea ce este abstract şi destul de straniu. În mecanica cuantică s-a dovedit că conservarea energiei e foarte strâns legată de altă proprietate importantă a lumii — *independenţa de timpul absolut*. Putem monta şi efectua o experienţă la un moment dat, iar apoi putem face aceeaşi experienţă la un moment ulterior; ea va decurge în acelaşi mod.

Dacă acest lucru e strict adevărat sau nu, nu ştim. Dacă presupunem că *este* adevărat şi îl corelăm cu principiile mecanicii cuantice, atunci putem deduce principiul conservării energiei. E un lucru destul de subtil şi de interesant, şi nu e uşor de explicat. Şi celelalte legi de conservare sunt corelate. Conservarea impulsului este asociată în mecanica cuantică cu afirmaţia că nu contează *unde* faci experienţa, rezultatele vor fi întotdeauna aceleaşi. La fel cum independenţa faţă de poziţia din spaţiu se leagă de conservarea impulsului, iar independenţa faţă de momentul de timp se leagă de conservarea energie, în fine, dacă *rotim* aparatul nostru, aceasta de asemenea nu contează, şi astfel invarianţa lumii în raport cu orientarea unghiulară este legată de conservarea *momentului cinetic*. Pe lângă acestea, există alte trei legi de conservare, exacte în măsura în care ne putem pronunţa azi şi mult mai simplu de înţeles pentru că seamănă cu numărarea cuburilor.

Prima din cele trei este *conservarea sarcinii*, aceasta însemnând pur şi simplu că număraţi câte sarcini pozitive sunt, din care scădeţi sarcinile negative găsite, iar acest număr nu se schimbă niciodată. Puteţi scăpa de una pozitivă şi una negativă, dar nu puteţi crea vreun exces net de sarcini pozitive faţă de sarcinile negative. Două alte legi sunt analoge acesteia — una din ele se numeşte *conservarea barionilor*. Există un număr de particule stranii (neutronul şi proto-

nul sunt exemple), care se numesc barioni. În oricare reacție din natură, dacă numărăm câți barioni intră într-un proces, numărul de barioni care ies va fi exact același (dacă numărăm antibarionul ca minus un barion). Există și o altă lege — *conservarea leptonilor.* Grupul de particule numite leptoni sunt: electronul, mezonul μ și neutrinul. Există un antielectron, numit și pozitron, adică minus un lepton. Socotirea numărului total de leptoni dintr-o reacție arată că numărul de leptoni intrați și ieșiți nu se schimbă niciodată, după câte știm în prezent.

Acestea sunt cele șase legi de conservare, trei dintre ele subtile, implicând spațiul și timpul, iar trei simple, în sensul că se numără ceva.

În privința conservării energiei, trebuie să observăm că energia *disponibilă* este o altă problemă — de exemplu există o mulțime de atomi agitându-se în apa mării, pentru că marea are o anumită temperatură, dar e imposibil să-i obligăm să efectueze o mișcare ordonată fără să luăm energie de altundeva. Adică, deși știm că energia se conservă, energia disponibilă în folosul omenirii nu se obține atât de ușor. Legile care determină câtă energie e disponibilă sunt *legile termodinamicii* și implică un concept numit entropie a proceselor termodinamice ireversibile.

Vreau să închei cu o remarcă privind sursele de energie din ziua de azi. Rezervele noastre de energie sunt în Soare, ploaie, cărbune, uraniu și hidrogen. Soarele produce ploaia și cărbunele, așa că toate acestea provin din Soare. Deși energia se conservă, natura nu pare preocupată de ce se întâmplă cu ea; se eliberează o grămadă de energie în Soare, dar numai o parte la două miliarde cade pe Pământ. Natura conservă energia, dar în realitate nu îi pasă de ea; cheltuiește cu nemiluita în toate părțile. Am obținut deja energie din uraniu; putem de asemenea căpăta energie din hidrogen, dar în prezent numai într-o formă explozivă și periculoasă. Dacă

ea ar putea fi controlată în reacţii termonucleare, energia care poate fi obţinută dintr-un curent de apă de 10 l pe secundă ar egala producţia de energie electrică a Statelor Unite. Cu 600 l de apă curgătoare pe minut am avea destul combustibil pentru a furniza toată energia folosită astăzi în SUA! Prin urmare, e sarcina fizicianului să găsească o cale de a ne elibera de constrângerile crizei energetice. Acest lucru e cu putinţă.

# 5
# Teoria gravitației

## MIȘCĂRILE PLANETARE

În acest capitol vom discuta una dintre cele mai îndrăznețe generalizări ale spiritului uman. Dacă admirăm spiritul uman, trebuie să ne oferim răgazul de a privi cu venerație și *natura* care urmează fără greș și în întreg ansamblul ei un principiu atât de simplu cum este legea gravitației. Ce e această lege a gravitației ? Ea afirmă că fiecare obiect din univers atrage fiecare alt obiect cu o forță care e proporțională cu masa fiecăruia și variază invers proporțional cu pătratul distanței dintre ele. Acest enunț poate fi exprimat matematic prin ecuația:

$$F = G\,\frac{mm'}{r^2}.$$

Dacă la aceasta adăugăm faptul că un obiect răspunde unei forțe suferind o accelerație în direcția forței, accelerație invers proporțională cu masa obiectului, vom avea tot ceea ce este necesar, căci un matematician suficient de abil va putea deduce atunci toate consecințele acestor două principii. Dar, întrucât nu se presupune că dumneavoastră ați fi ajuns deja suficient de abili, o să discutăm consecințele mai în detaliu și nu o să vă las doar cu enunțul acestor două

principii. Voi spune pe scurt povestea descoperirii legii gravitației și vom discuta câteva din consecințele ei, efectele sale asupra istoriei, misterele pe care o astfel de lege le aduce cu sine și câteva dezvoltări ale acestei legi datorate lui Einstein; vom discuta de asemenea legăturile legii cu alte legi ale fizicii. Toate acestea nu pot fi tratate într-un singur capitol și vor fi prezentate la timpul potrivit în capitolele următoare.

Povestea a început atunci când anticii, observând mișcările planetelor printre stele, au stabilit în cele din urmă că ele se rotesc în jurul Soarelui, fapt redescoperit mai târziu de Copernic. *Cum anume* se rotesc planetele în jurul Soarelui, cu *ce fel de mișcare* — acest lucru a cerut mai mult efort pentru a fi descoperit. La începutul secolului al XV-lea se discuta aprins dacă planetele se rotesc într-adevăr în jurul Soarelui sau nu. Tycho Brahe a avut o idee diferită de tot ce propuseseră anticii; ideea sa era că aceste dezbateri asupra naturii mișcării planetelor vor fi tranșate dacă vor fi măsurate suficient de precis pozițiile reale ale planetelor pe cer. Dacă măsurătoarea va arăta în mod exact cum se mișcă planetele, atunci poate va fi posibil să se confirme un punct de vedere sau altul. A fost o idee formidabilă — pentru a afla ceva e mai bine să efectuezi experiențe precise decât să recurgi la argumente filozofice profunde. Urmărind această idee, Tycho Brahe a studiat timp de mulți ani pozițiile planetelor în observatorul său de pe insula Hven, lângă Copenhaga. El a alcătuit tabele voluminoase, care au fost studiate de matematicianul Kepler după moartea lui Tycho. Kepler a descoperit din aceste date câteva legi remarcabile, foarte frumoase și în același timp simple, privind mișcarea planetară.

## Legile lui Kepler

Mai întâi, Kepler a găsit că fiecare planetă se rotește în jurul Soarelui pe o curbă numită *elipsă*, cu Soarele într-un

focar. O elipsă nu e doar o formă ovală, ci este o curbă foarte precisă. Ea poate fi obținută folosind două cuișoare, câte unul în fiecare focar, o sfoară și un creion; matematic, ea e locul geometric al tuturor punctelor a căror sumă a distanțelor la două puncte fixe (focarele) este o constantă. Sau, dacă vreți, este un cerc văzut în perspectivă (fig. 5.1).

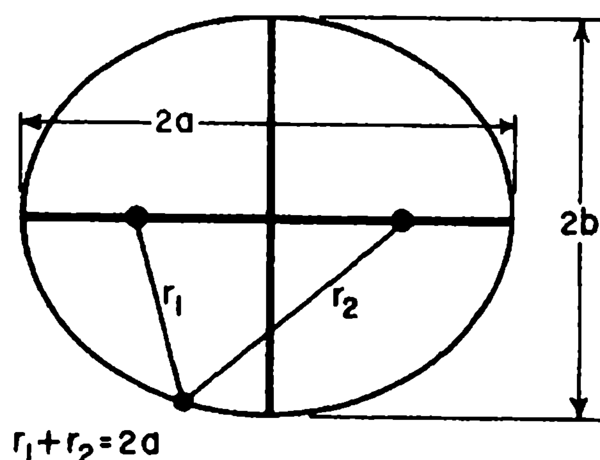



*Fig. 5.1.* O elipsă

A doua observație a lui Kepler a fost că planetele nu se rotesc în jurul Soarelui cu viteză constantă, ci se mișcă mai repede când sunt mai aproape de Soare și mai lent când sunt mai departe de acesta, în mod precis astfel: să ne închipuim că o planetă este observată la două momente de timp succesive oarecare, de pildă la interval de o săptămână, și să trasăm raza vectoare* a planetei pentru fiecare poziție observată. Arcul de orbită descris de planetă în decursul săptămânii și cele două raze vectoare mărginesc o anumită arie plană, aria hașurată din figura 5.2. Dacă este făcută o observație similară după un anumit timp într-o parte a orbitei mai depărtată de Soare (unde planeta se mișcă mai încet), aria mărginită în mod similar este exact aceeași ca în primul caz. Astfel, după cum afirmă legea a doua, viteza orbitală a fiecărei planete este astfel încât raza „mătură" arii egale în timpi egali.

---

* Rază vectoare este segmentul de dreaptă orientat dus de la Soare către un punct de pe orbita planetei. (*N. a.*)

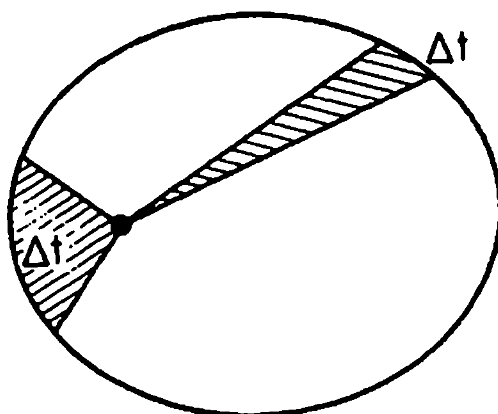



*Fig. 5.2.* Legea ariilor a lui Kepler

În fine, a treia lege a fost descoperită de Kepler mult mai târziu; această lege are natură diferită de a celorlalte două pentru că nu are în vedere numai o singură planetă, ci face legătură între o planetă și alta. Această lege spune că atunci când sunt comparate perioadele orbitale și dimensiunile orbitelor oricăror două planete, perioadele sunt proporționale cu puterea 3/2 a dimensiunilor orbitelor. În acest enunț perioada este intervalul de timp care îi trebuie unei planete pentru a efectua o rotație completă pe orbită, iar dimensiunea este măsurată prin lungimea celui mai mare diametru al orbitei eliptice, cunoscut în geometrie ca axa mare. Mai simplu, dacă planetele s-ar roti pe cercuri, așa cum de altfel aproape că se întâmplă, timpul necesar pentru a parcurge cercul va fi proporțional cu puterea 3/2 a diametrului (sau razei).

Așadar, cele trei legi ale lui Kepler sunt:

I. Fiecare planetă se mișcă în jurul Soarelui pe o elipsă, cu Soarele într-unul din focare.

II. Raza vectoare de la Soare la planetă mătură arii egale în intervale de timp egale.

III. Pătratele perioadelor oricăror două planete sunt proporționale cu cuburile semiaxelor mari ale orbitelor lor respective: $T \sim a^{3/2}$.

## Dezvoltarea dinamicii

În timp ce Kepler descoperea aceste legi, Galileu studia legile mișcării. Problema era: ce face ca planetele să se ro-

tească? (În vremea aceea, una dintre teoriile propuse era că planetele se rotesc fiindcă în spatele lor stau niște îngeri invizibili, care bat din aripi și le împing înainte. Veți vedea însă că această teorie a fost modificată între timp! Într-adevăr, pentru a menține planetele în rotație, îngerii invizibili ar trebui să zboare într-o direcție diferită, și se vădește că ei nu au aripi! Altminteri, teoria este oarecum asemănătoare!) Galileu a descoperit un fapt remarcabil despre mișcare, fapt esențial pentru înțelegerea acestor legi. Acesta este principiul *inerției* — dacă un corp se mișcă fără să fie atins de nimic și complet neperturbat, el va continua să se miște neîncetat, deplasându-se cu o viteză constantă și în linie dreaptă. (*De ce* continuă să se deplaseze? Nu știm, dar așa stau lucrurile.)

Newton a completat această idee spunând că singura cale de a schimba mișcarea unui corp este folosirea *forței*. Dacă își iuțește mișcarea înseamnă că a fost aplicată o forță în *direcția mișcării*. Pe de altă parte, dacă mișcarea sa ia o nouă *direcție* înseamnă că a fost aplicată *lateral* o forță. Newton a adăugat astfel ideea că e necesară o forță pentru a schimba viteza sau *direcția* mișcării unui corp. De exemplu, dacă se leagă o piatră cu o sfoară și se învârte pe un cerc, e nevoie de o forță ca piatra să fie menținută pe cerc. Trebuie să *tragem* de sfoară. De fapt, legea afirmă că accelerația produsă de o forță este invers proporțională cu masa, sau forța este proporțională cu masa ori accelerația. Cu cât este mai masiv un obiect, cu atât mai puternică este forța necesară pentru a produce o accelerație dată. (Masa poate fi măsurată punând alte pietre la capătul aceleiași sfori și făcându-le să se învârtă pe același cerc cu aceeași viteză. În acest mod se găsește că e necesară mai multă sau mai puțină forță, obiectul mai masiv necesitând mai multă forță.) Ideea strălucită ce rezultă din aceste considerații este: nu-i necesară nici o forță *tangențială* pentru a menține o planetă pe orbita sa

(îngerii nu trebuie să împingă tangenţial), pentru că planeta va merge oricum în acea direcţie. Dacă nu ar exista absolut nimic care s-o perturbe, planeta ar merge în *linie dreaptă.* Dar mişcarea reală se abate de la linia pe care ar fi mers corpul dacă nu ar exista nici o forţă, deviaţia fiind în *unghi drept* faţă de direcţia mişcării. Cu alte cuvinte, din cauza principiului inerţiei, forţa necesară pentru a controla mişcarea unei planete în jurul Soarelui nu este o forţă *în jurul* Soarelui, ci îndreptată *către* Soare. (Dacă există o forţă către Soare, Soarele ar putea fi desigur îngerul!)

## Legea lui Newton despre gravitaţie

Din înţelegerea mai bună a teoriei mişcării, Newton a apreciat că *Soarele* ar putea fi sediul forţelor care guvernează mişcarea planetelor. Newton şi-a demonstrat (şi poate vom fi şi noi în stare să demonstrăm în curând) că tocmai faptul că arii egale sunt măturate în timpi egali reprezintă un indiciu precis al propoziţiei: toate deviaţiile sunt neapărat *radiale* — legea ariilor este o consecinţă directă a ideii că toate forţele sunt dirijate exact *către Soare.*

Mai departe, analizând a treia lege a lui Kepler, se poate arăta că forţele sunt cu atât mai slabe cu cât planeta se află mai departe. Dacă se compară două planete la distanţe diferite de Soare, analiza arată că forţele sunt invers proporţionale cu pătratele distanţelor respective. Dintr-o combinare a celor două legi, Newton a conchis că trebuie să existe o forţă, inversă cu pătratul distanţei, dirijată după linia care uneşte cele două corpuri.

Fiind un om cu o formidabilă putere de generalizare, Newton a presupus că această relaţie se aplică mai general, nu numai Soarelui şi planetelor. Se ştia deja, de exemplu, că planeta Jupiter are sateliţi ce se rotesc în jurul ei, aşa cum se

rotește Luna în jurul Pământului, iar Newton a fost sigur că fiecare planetă își stăpânește sateliții printr-o forță. El cunoștea deja forța care ne ține *pe noi* pe Pământ, astfel că a presupus că aceasta e o forță *universală* — că *orice corp atrage alt corp.*

Problema următoare era dacă atracția Pământului asupra oamenilor este „aceeași“ cu atracția sa asupra Lunii, adică invers proporțională cu pătratul distanței. Dacă un obiect de pe suprafața Pământului cade 4,9 m în prima secundă după ce i s-a dat drumul din repaus, până unde cade Luna în același timp ? Am putea spune că Luna nu cade deloc. Dar dacă nu s-ar exercita o forță asupra Lunii, ea s-ar îndepărta în linie dreaptă, când de fapt ea se învârte pe un cerc, așa că într-adevăr ea *cade spre interior* din locul de unde s-ar fi aflat dacă nu ar fi existat nici o forță. Putem calcula — din raza orbitei Lunii (care este aproximativ 384 000 km) și din timpul necesar pentru a se roti în jurul Pământului (aproximativ 29 de zile) — cât de mult se mișcă Luna pe orbita sa circulară într-o secundă, iar apoi putem calcula cu cât cade ea într-o secundă*. Rezultă o distanță egală cu aproximativ 1,36 mm într-o secundă. Aceasta se potrivește foarte bine cu legea inversului pătratului, pentru că raza Pământului este 6370 km, iar, dacă un corp care se află la 6370 km de centrul Pământului cade 4,9 m într-o secundă, ceva ce se află la 384 000 km (sau de 60 de ori mai departe) trebuie să cadă numai 1/3600 din 4,9 m, adică aproximativ 1,36 mm. Vrând să supună această teorie a gravitației unei verificări prin calcule similare, Newton a calculat cu multă atenție și a găsit o discrepanță atât de mare, încât a considerat că teoria sa e contrazisă de fapte și nu și-a publicat rezultatele. Șase ani mai târziu, o nouă măsurătoare a dimensiunilor Pământului a arătat că astronomii

---

* Adică, cu cât deviază cercul orbitei Lunii de la linia dreaptă tangentă la el în punctul unde Luna se afla cu o secundă în urmă. (*N. a.*)

folosiseră o distanţă incorectă Pământ–Lună. Când Newton a aflat, a repetat calculul cu numerele corectate şi a obţinut un frumos acord.

Această idee că Luna „cade“ e oarecum derutantă, pentru că, după cum vedeţi, ea nu se *apropie* deloc de Pământ. Ideea e suficient de interesantă pentru a merita o analiză mai atentă: Luna cade în sensul că ea *se abate de la linia dreaptă pe care ar urma-o dacă nu ar exista forţe.* Să luăm un exemplu de pe suprafaţa Pământului. Un obiect căruia i se dă drumul în apropiere de suprafaţa Pământului va cădea 4,9 m în prima secundă. Un obiect aruncat *orizontal* va cădea de asemenea 4,9 m. Chiar dacă se mişcă orizontal, el cade cu aceiaşi 4,9 m într-o secundă. Figura 5.3 prezintă un aparat care demonstrează aceasta.

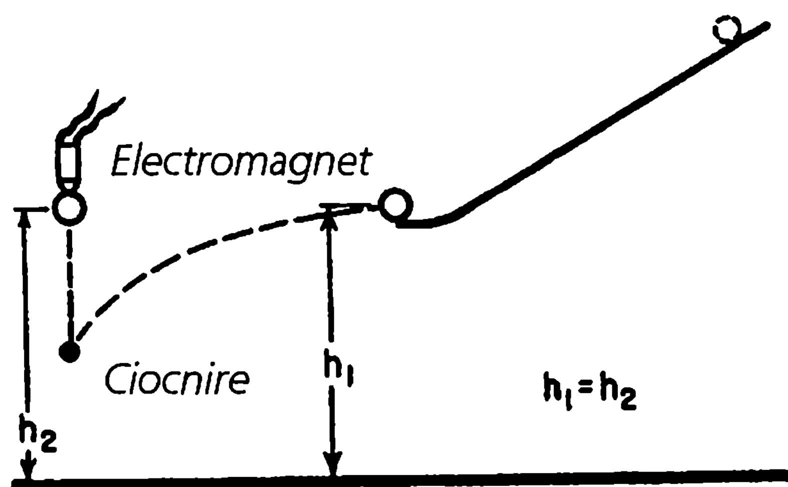



*Fig. 5.3.* Aparat pentru demonstrarea independenţei mişcărilor verticală şi orizontală

O bilă este lansată orizontal cu ajutorul unui plan înclinat. La o distanţă potrivită şi la aceeaşi înălţime se află o bilă care va cădea vertical. Există un întrerupător electric conceput astfel încât în momentul când este lansată prima bilă să se dea drumul celei de-a doua. Faptul că ele cad aceeaşi distanţă în acelaşi timp este dovedit de ciocnirea în aer a bilelor. Un obiect, cum ar fi un glonţ, lansat orizontal, ar putea merge departe într-o secundă — vreo 600 m —, dar va cădea totuşi 4,9 m dacă s-a ţintit orizontal. Ce se întâmplă

dacă tragem din ce în ce mai repede ? Nu uitați că suprafața Pământului este curbă. Dacă lansăm glonțul destul de repede, atunci când cade cu 4,9 m s-ar putea întâmpla ca el să fie exact la aceeași înălțime deasupra Pământului ca și înainte. Cum se poate una ca asta ? Glonțul cade totuși, dar Pământul se curbează, așa încât el cade „în jurul" Pământului. Întrebarea este: cât de departe trebuie să ajungă glonțul într-o secundă ca acolo suprafața Pământului să fie cu 4,9 m sub planul orizontului ? În figura 5.4 vedem Pământul cu raza sa de 6370 km și drumul tangențial drept pe care l-ar urma glonțul dacă nu ar exista nici o forță. Să folosim una din acele minunate teoreme ale geometriei, care spune că lungimea unei jumătăți de coardă este egală cu media geometrică a celor două segmente determinate de ea pe un diametru perpendicular. Vedem astfel că distanța orizontală care trebuie parcursă este media geometrică între cei 4,9 m căzuți și diametrul de 12 740 km al Pământului, adică

$$\sqrt{0{,}0049 \cdot 12\ 740} \approx 7{,}9 \text{ km.}$$

Astfel, vedem că dacă glonțul se deplasează cu 7,9 km pe secundă, el va continua să cadă către Pământ cu aceeași

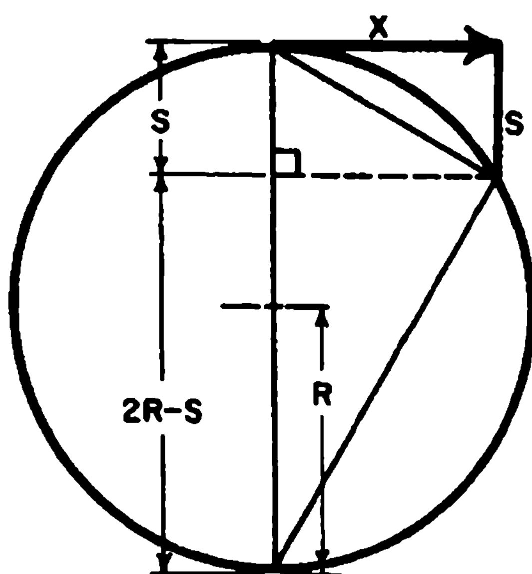



*Fig. 5.4.* Accelerația către centrul unui drum circular. Din geometria plană, $x/s = (2R - S)/x = 2R/x$, unde $R$ este raza Pământului, 6 370 km, $x$ este distanța „parcursă orizontal" într-o secundă, iar $S$ este distanța „parcursă în cădere" într-o secundă (4,9 m).

distanță de 4,9 m pe secundă, dar nu va ajunge niciodată nici măcar cu puțin mai aproape de Pământ, fiindcă acesta continuă să se curbeze. Așa s-a făcut că Gagarin s-a menținut în spațiu în timp ce s-a învârtit 40 000 km în jurul Pământului cu aproximativ 8 km pe secundă. (I-a luat ceva mai mult timp pentru că se afla pe o orbită ceva mai înaltă.)

Orice descoperire a unei noi legi este utilă numai dacă putem obține din ea mai mult decât am pus. Or, Newton a *folosit* a doua și a treia lege a lui Kepler pentru a deduce legea sa privind gravitația. Ce a *prezis* el? În primul rând, analiza sa asupra mișcării Lunii reprezenta o predicție pentru că lega căderea obiectelor de pe suprafața Pământului de căderea Lunii. În al doilea rând, se pune întrebarea: *este orbita o elipsă*? Vom vedea într-un capitol ulterior cum e posibil să se determine mișcarea exact, și într-adevăr se poate demonstra că ea trebuie să aibă loc după o elipsă*, astfel încât nu e nevoie de nici un fapt suplimentar pentru a explica *prima* lege a lui Kepler. Astfel a făcut Newton prima sa predicție importantă.

Legea gravitației explică multe fenomene până atunci neînțelese. De exemplu, atracția Lunii asupra Pământului provoacă mareele, care păreau învăluite în mister. Luna atrage apa în sus către ea și produce mareele — oamenii se gândiseră la aceasta înainte, dar nu erau la fel de ingenioși ca Newton, așa încât credeau că ar trebui să existe doar o singură maree în timpul zilei. Raționamentul era că Luna atrage apa în sus către ea producând un flux și un reflux, iar de vreme ce Pământul se învârte sub ea, aceasta face ca mareea dintr-un anumit loc să urce și să coboare la fiecare 24 de ore. În realitate, mareea urcă și coboară în 12 ore. Altă părere era că fluxul trebuie să fie de cealaltă parte a Pământului, fiindcă Luna atrage Pământul separat, vrând să-l despartă

* Demonstrația nu este dată în cursul nostru. (*N. a.*)

de apă! Ambele teorii sunt greșite. În realitate, lucrurile stau în felul următor: atracția Lunii față de Pământ și apă este „echilibrată“ la centru. Dar apa care se află mai aproape de Lună este atrasă *mai mult* decât cea aflată la distanță medie, iar apa care se află mai departe e atrasă *mai puțin* decât cea aflată la distanță medie. În plus, apa poate curge, pe când Pământul, mai rigid, nu poate. Imaginea adevărată este o combinație a acestor două aspecte.

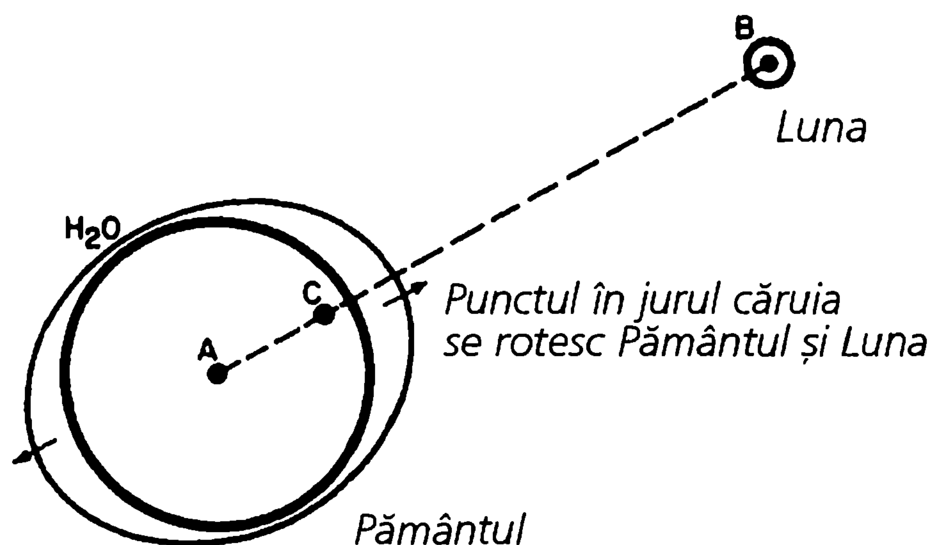



*Fig. 5.5.* Sistemul Pământ–Lună, cu mareele

Ce înțelegem prin cuvântul „echilibrată“? Ce se echilibrează? Dacă Luna atrage întregul Pământ către ea, de ce nu se prăbușește acesta drept „în sus“ spre Lună? Fiindcă Pământul face aceeași scamatorie ca și Luna, el se învârte pe un cerc în jurul unui punct care e situat în interiorul lui, dar nu în centru. Nici Luna nu se învârte exact în jurul centrului Pământului. Pământul și Luna se învârt ambele în jurul unei poziții centrale comune, fiecare „căzând“ către această poziție, după cum se arată în figura 5.5. Această mișcare în jurul centrului comun este cea care echilibrează căderea fiecăruia. Așa că Pământul nu se deplasează nici el în linie dreaptă, ci străbate un cerc. „Forța centrifugă“ corespunzătoare centrului Pământului este echilibrată de atracția Lunii. Atracția Lunii pe partea diametral opusă (îndepărtată) a Pământului e mai slabă, iar „forța centrifugă“ e mai

puternică. Rezultatul acestui dezechilibru e că apa se ridică într-o direcţie pornind dinspre centrul Pământului. Pe partea apropiată, atracţia exercitată de Lună este mai puternică şi, deoarece raza vectoare e mai scurtă, „forţa centrifugă" e mai slabă, iar dezechilibrul se produce în direcţia opusă în spaţiu, dar din nou *dinspre* centrul Pământului. Rezultatul net este că obţinem *două* „umflături" ale mareei.

## Gravitaţia universală

Ce altceva mai putem înţelege după ce am reuşit să înţelegem gravitaţia? Fiecare ştie că Pământul e rotund. De ce e Pământul rotund? Simplu: datorită gravitaţiei. Se poate înţelege că Pământul e rotund pur şi simplu pentru că orice parte a sa atrage oricare altă parte, iar astfel el s-a atras pe sine laolaltă cât s-a putut de mult! Dacă mergem încă mai departe, Pământul nu este *exact* o sferă pentru că el se roteşte, iar asta introduce efecte centrifugale care tind să se opună gravitaţiei în apropiere de ecuator. Rezultă că Pământul ar trebui să fie eliptic şi chiar putem obţine forma corectă a elipsei. Putem deduce astfel că Soarele, Luna şi Pământul trebuie să fie (aproape) sfere, doar din legea gravitaţiei.

Ce altceva mai poţi face cu legea gravitaţiei? Dacă privim la sateliţii lui Jupiter, putem înţelege totul despre modul în care ei se mişcă în jurul acestei planete. În treacăt fie spus, a existat cândva o dificultate în privinţa sateliţilor lui Jupiter care merită pomenită. Aceşti sateliţi au fost studiaţi foarte atent de Römer, care a observat că ei păreau uneori a fi în avans faţă de orar, iar alteori în urmă. (Se pot găsi orariile lor aşteptând un timp foarte lung şi aflând cât timp le trebuie în medie ca să facă un tur complet.) Or, ei erau *în avans* când Jupiter era foarte *aproape* de Pământ şi *în urmă* când Jupiter era foarte *departe* de Pământ. Lucrul pă-

rea foarte greu de explicat pe baza teoriei gravitației — ar fi reprezentat, de fapt, moartea acestei minunate teorii, dacă nu ar fi existat vreo explicație. Dacă o lege nu funcționează doar într-o *singură* ocazie în care ar trebui să funcționeze, ea e pur și simplu greșită. Dar motivul discrepanței era foarte simplu și frumos: e nevoie de un mic răstimp până să *vezi* lunile lui Jupiter, din cauza timpului care îi trebuie luminii ca să se propage de la Jupiter până la Pământ. Când Jupiter este mai aproape de Pământ, timpul e ceva mai mic, iar când este mai departe de Pământ, timpul e mai lung. De aceea sateliții apar, în medie, puțin în avans sau puțin în urmă, în funcție de distanța lor față de Pământ. Acest fenomen a arătat că lumina nu se propagă instantaneu și a furnizat prima estimare a vitezei luminii. Ea a fost făcută în 1656.

Dacă toate planetele se împing și se trag una pe alta, forța care controlează, de pildă, mișcarea de rotație a lui Jupiter în jurul Soarelului nu e doar forța provenind de la Soare; există de asemenea o atracție provenind de la, să zicem, Saturn. Această forță nu e prea puternică, fiindcă Soarele este mult mai mare decât Saturn, dar există totuși o oarecare atracție, așa încât orbita lui Jupiter trebuie să nu fie o elipsă perfectă, și nici nu este; ea e ușor deformată, planeta deplasându-se oarecum în „zigzag“ în jurul orbitei eliptice corecte. O astfel de mișcare este ceva mai complicată. Au fost făcute încercări de a se analiza mișcările lui Jupiter, Saturn și Uranus pe baza legii gravitației. Efectele fiecăreia dintre aceste planete asupra fiecăreia dintre celelalte două au fost calculate pentru a se vedea dacă foarte micile deviații și neregularități în aceste mișcări puteau fi sau nu înțelese prin această singură lege. Într-adevăr, pentru Jupiter și Saturn totul era în regulă, dar Uranus se comporta într-o manieră foarte ciudată. Nu se deplasa pe o elipsă exactă, ceea ce era de înțeles din cauza atracțiilor lui Jupiter și Saturn. Dar chiar și dacă se ținea seama de aceste atracții, Uranus *tot* nu se

deplasa aşa cum ar fi trebuit, astfel că legile gravitaţiei erau în pericol de a fi răsturnate, posibilitate ce nu putea fi exclusă. Doi oameni, Adams şi Leverrier, în Anglia şi Franţa, au ajuns independent la o altă posibilitate: poate că există o *altă* planetă, întunecată şi invizibilă, pe care oamenii nu au văzut-o. Această planetă, *N*, ar putea atrage pe Uranus. Ei au calculat unde ar trebui să se afle o astfel de planetă pentru a provoca perturbaţiile observate. Au trimis comunicări observatoarelor din ţările lor, spunând: „Domnilor, îndreptaţi-vă telescopul către cutare şi cutare loc şi veţi vedea o nouă planetă." De multe ori depinde cu cine lucrezi pentru a ţi se acorda atenţie. I s-a acordat atenţie lui Leverrier; s-au uitat şi planeta era într-adevăr acolo! Celălalt observator s-a grăbit de asemenea să privească în următoarele zile şi a înregistrat-o şi el.

Această descoperire arată că legile lui Newton sunt absolut corecte în sistemul solar; dar se extind ele dincolo de distanţele relativ mici până la cele mai apropiate planete? Primul test se leagă de întrebarea: se atrag *stelele una pe alta* la fel ca şi planetele? Avem o dovadă clară că da în cazul *stelelor duble.* Figura 5.6 prezintă o stea dublă — două stele foarte apropiate (există de asemenea o a treia stea în imagi-

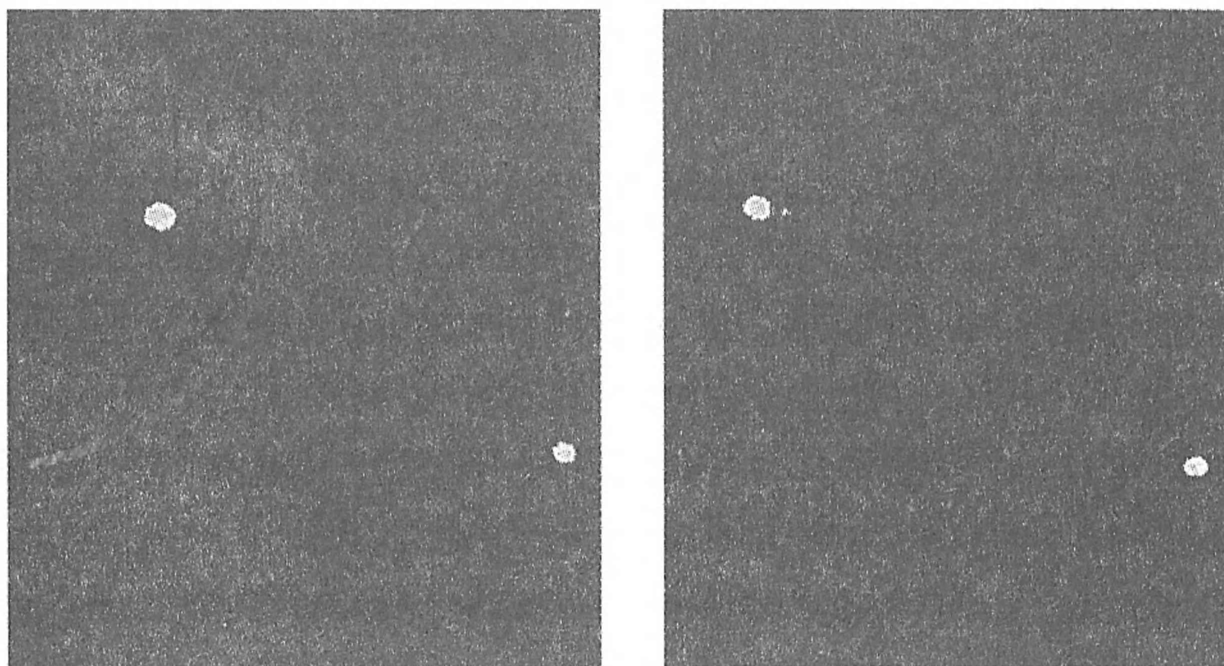


*Fig. 5.6.* Sistemul unei stele duble

ne, așa încât vom putea ști că fotografia nu a fost rotită). Stelele sunt prezentate în a doua fotografie așa cum au apărut câțiva ani mai târziu. Vedem că, în raport cu steaua „fixă", axa perechii s-a rotit, adică cele două stele se învârt una în jurul celeilalte. Se rotesc ele oare în conformitate cu legile lui Newton? Măsurători precise ale pozițiilor relative ale unui asemenea sistem de stea dublă sunt arătate în figura 5.7. Vedem acolo o frumoasă elipsă, măsurătorile începând în 1862 și mergând de jur-împrejur până în 1904 (de atunci trebuie să fi avut loc încă o rotație completă). Totul coincide cu legile lui Newton, exceptând faptul că steaua Sirius A *nu se află în focar.* De ce? Pentru că planul elipsei nu este în „planul cerului". Nu privim perpendicular planul orbitei, iar când o elipsă e privită înclinat ea rămâne elipsă, dar focarul nu mai e în același loc. Astfel, putem analiza stelele duble, mișcându-se una față de cealaltă, în conformitate cu cerințele legii gravitaționale.

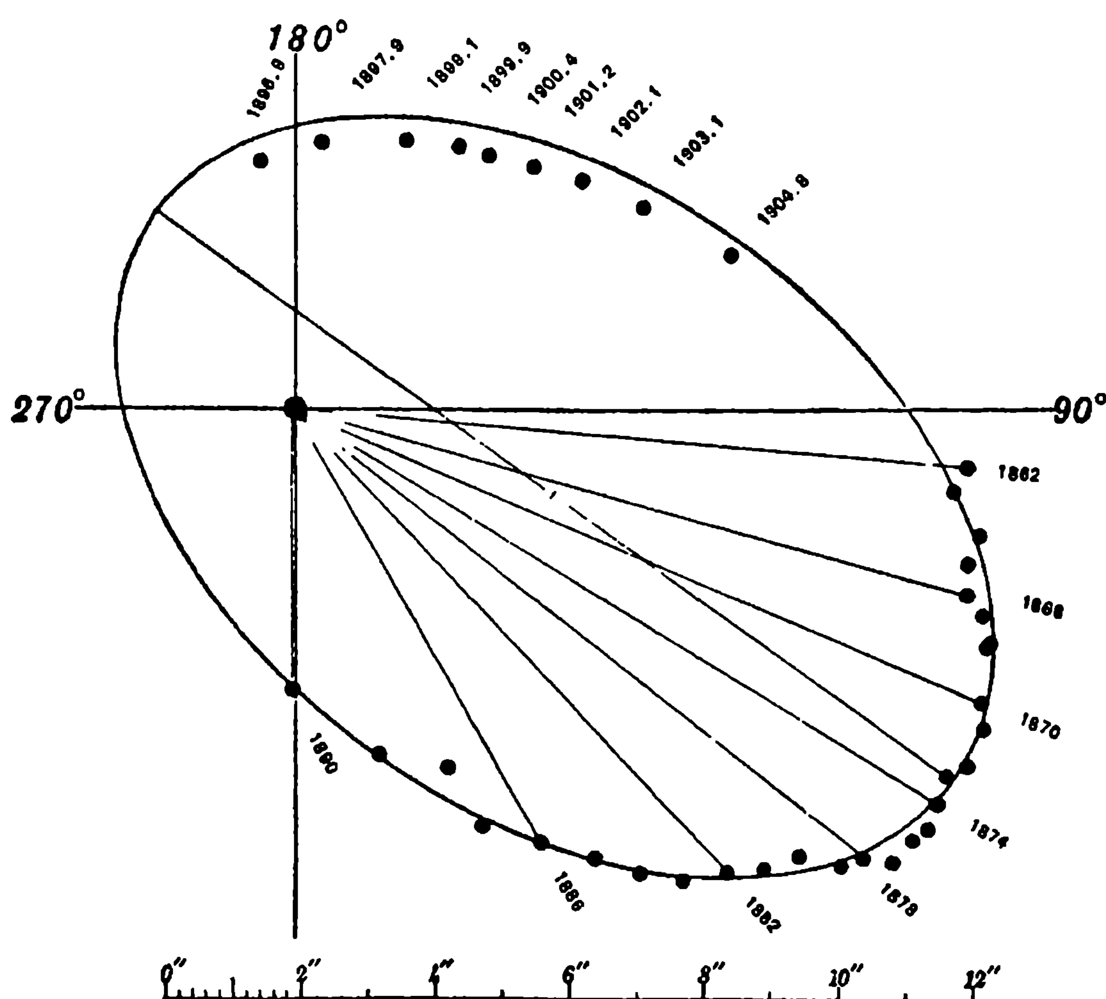



*Fig. 5.7.* Orbita lui Sirius B în raport cu Sirius A

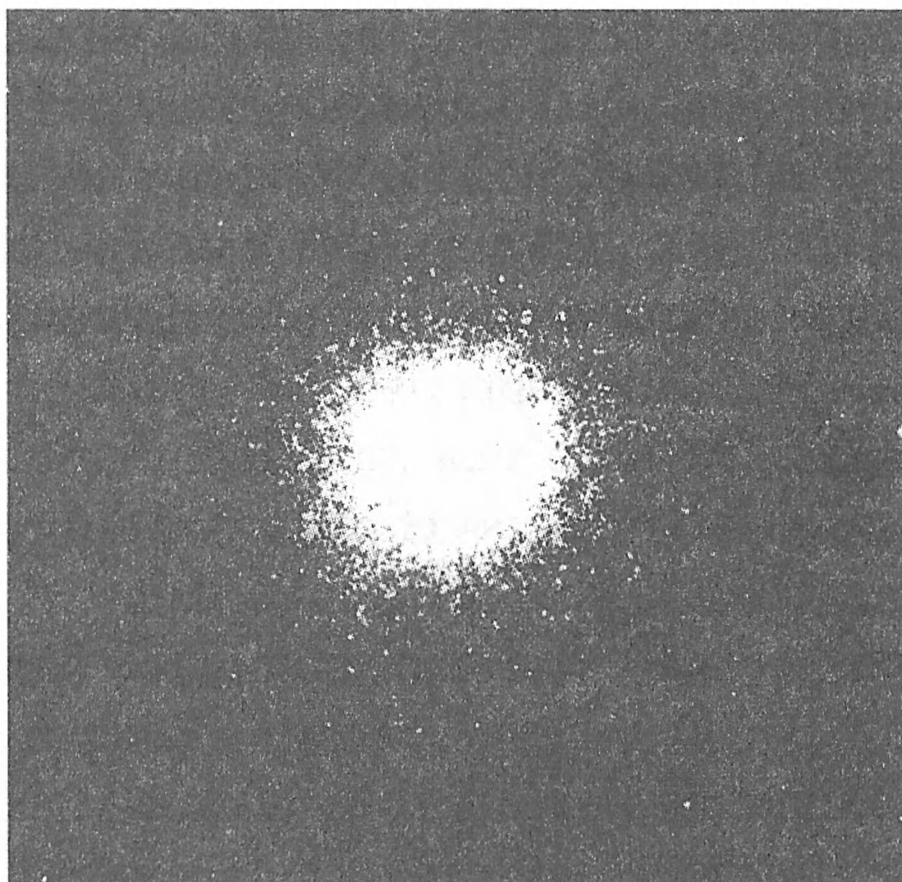


*Fig. 5.8.* O îngrămădire globulară de stele

Faptul că legea gravitației este adevărată la distanțe încă și mai mari e indicat în figura 5.8. Cine nu vede gravitația acționând aici n-are suflet. Această figură arată unul dintre cele mai frumoase lucruri de pe cer — o îngrămădire globulară de stele. Toate punctele sunt stele. Deși ele arată ca și cum ar fi înghesuite, atingându-se în centrul figurii, aceasta se datorează insuficienței rezoluției instrumentelor noastre. De fapt, distanțele — chiar dintre stele din centru — sunt foarte mari și ele se ciocnesc foarte rar. Există mai multe stele în interior decât la distanțe mari, și pe măsură ce ne îndepărtăm sunt din ce în ce mai puține. Evident, apare o atracție între aceste stele. E clar că gravitația există și la aceste dimensiuni enorme, poate de 100 000 de ori dimensiunea sistemului nostru solar. Să mergem acum mai departe și să privim la întreagă galaxie, prezentată în figura 5.9. Forma acestei galaxii indică o evidentă tendință a materiei sale de a se aglomera. Desigur, nu putem dovedi că legea este aici în mod precis cea a proporționalității cu inversul pătratului, ci doar că există o atracție care, la această dimensiune enormă, ține

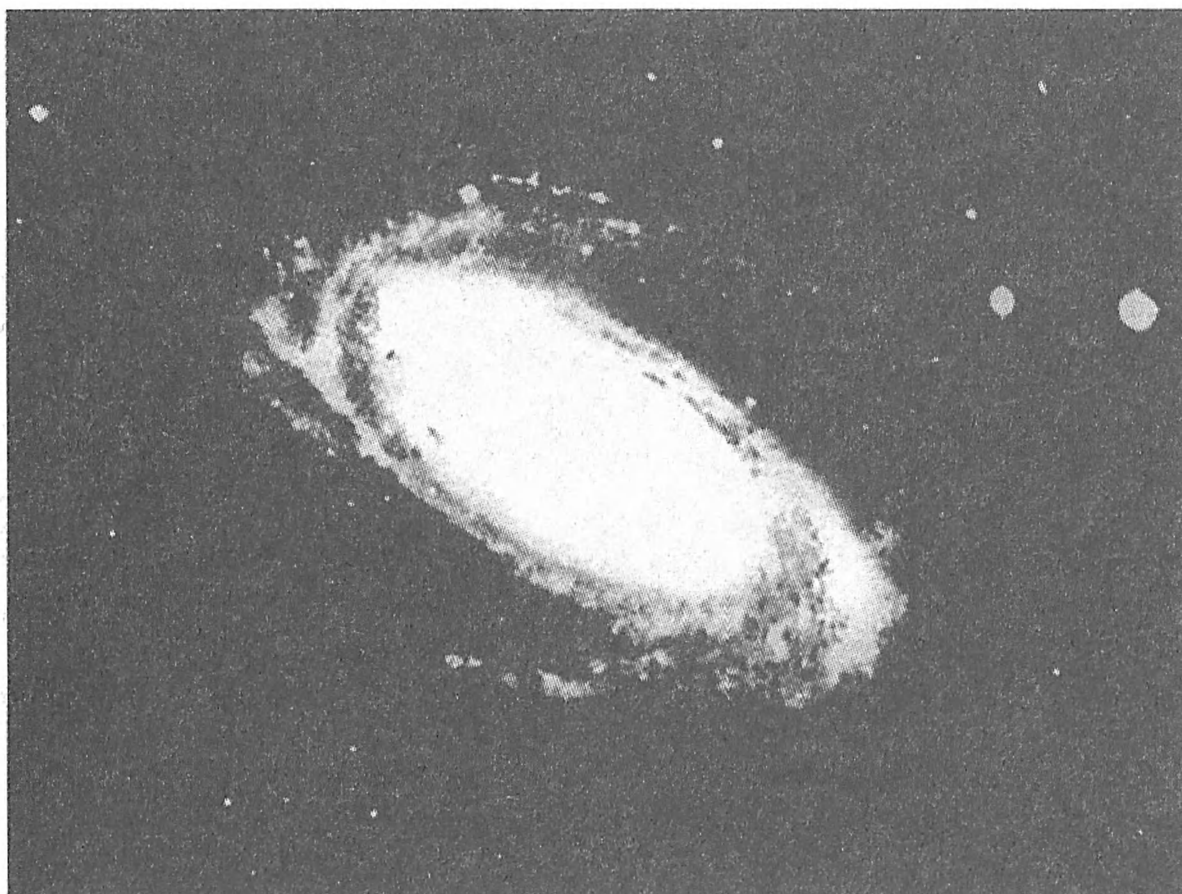


*Fig. 5.9.* O galaxie

toată galaxia laolaltă. Se poate spune: „Bine, toate acestea sunt foarte ingenioase, dar de ce nu e chiar o bilă?" Pentru că se *rotește* și are un *moment cinetic* pe care nu-l poate pierde atunci când se contractă; ea trebuie să se contracte mai ales într-un plan. (Apropo, dacă sunteți în căutarea unei probleme interesante, detaliile exacte despre felul în care se formează brațele și ce anume determină forma acestor galaxii încă nu au fost determinate.) Este totuși limpede că forma galaxiei se datorează gravitației, chiar dacă complexitățile structurii sale nu ne-au permis încă s-o analizăm complet. Într-o galaxie avem dimensiuni de poate 50 000 până la 100 000 de ani-lumină. Distanța Pământ–Soare este de 8 1/3 *minute*-lumină, așa că vă puteți da seama cât de mari sunt aceste dimensiuni.

Gravitația pare să existe chiar și la dimensiuni și mai mari, așa cum e indicat în figura 5.10, în care se văd multe corpuri „mici" înghesuite laolaltă. Aceasta e o *formațiune de galaxii*, exact ca o formațiune stelară. Deci galaxiile se atrag una pe alta chiar și la distanțele la care se află, astfel încât

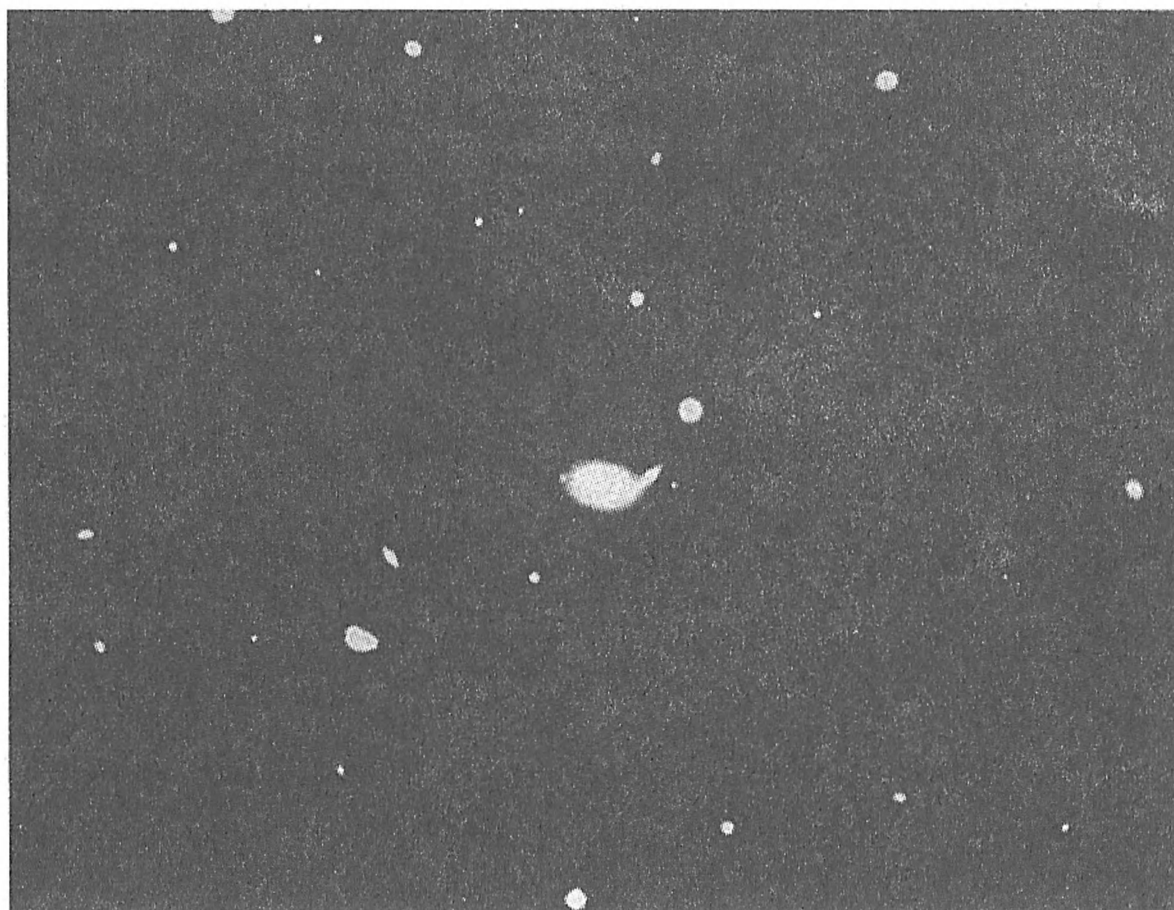


*Fig. 5.10.* O formaţiune de galaxii

şi ele sunt aglomerate în asemenea formaţiuni. Poate că gravitaţia acţionează chiar şi la distanţe de *zeci de milioane* de ani-lumină; după câte ştim, gravitaţia pare să varieze totdeauna invers proporţional cu pătratul distanţei.

Nu numai că putem înţelege nebuloasele, dar din legea gravitaţiei putem chiar obţine câteva informaţii asupra originii stelelor. Dacă avem un nor mare de praf şi gaz, aşa cum se vede în figura 5.11, atracţiile gravitaţionale dintre firele de praf le pot face pe acestea să formeze mici îngrămădiri. Abia vizibile, în figură apar „mici" pete negre ce pot reprezenta începutul unor acumulări de praf şi gaze care, datorită atracţiei dintre ele, încep să formeze stele. Dacă până în prezent a fost sau nu văzută o stea în curs de formare rămâne încă sub semnul întrebării. Figura 5.12 conţine dovada care sugerează că un asemenea fenomen a fost observat. În stânga se află imaginea unei regiuni de gaz cu câteva stele în ea, fotografiată în 1947, iar în dreapta e altă imagine, fotografiată numai cu 7 ani mai târziu, care arată două noi pete luminoase. S-a acumulat gazul, a acţionat gravita-

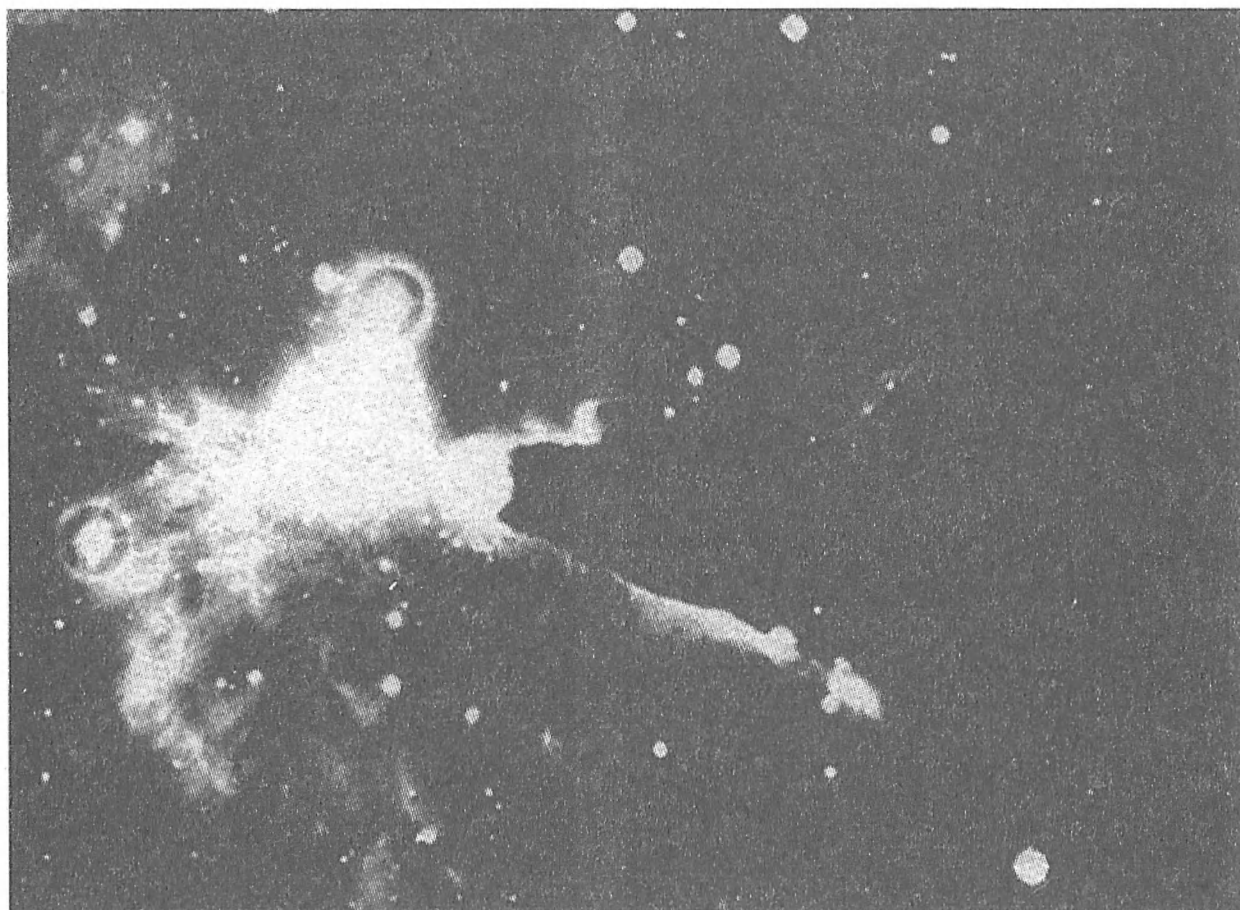


*Fig. 5.11.* Un nor de praf interstelar

ția suficient de intens și l-a colectat într-o bilă destul de mare pentru ca reacțiile nucleare stelare să înceapă înăuntru și să o transforme într-o stea? Poate că da, poate că nu. E greu de crezut ca în numai șapte ani să fim atât de norocoși încât să vedem o stea transformându-se într-o formă vizibilă; e și mai puțin probabil să vedem *două*!

## Experiența lui Cavendish

Gravitația se extinde, așadar, pe distanțe enorme. Dar dacă există o forță între *orice* pereche de obiecte, ar trebui să fim în stare să măsurăm forța dintre propriile noastre obiecte. În loc să trebuiască să urmărim stelele învârtindu-se una în jurul celeilalte, de ce nu putem lua o sferă de plumb și o bilă și să observăm bila apropiindu-se de sfera de plumb? Dificultatea acestei experiențe, când e făcută într-o manieră atât de simplă, constă în valoarea extrem de mică a forței. Ea trebuie efectuată cu extremă atenție, adică aparatul

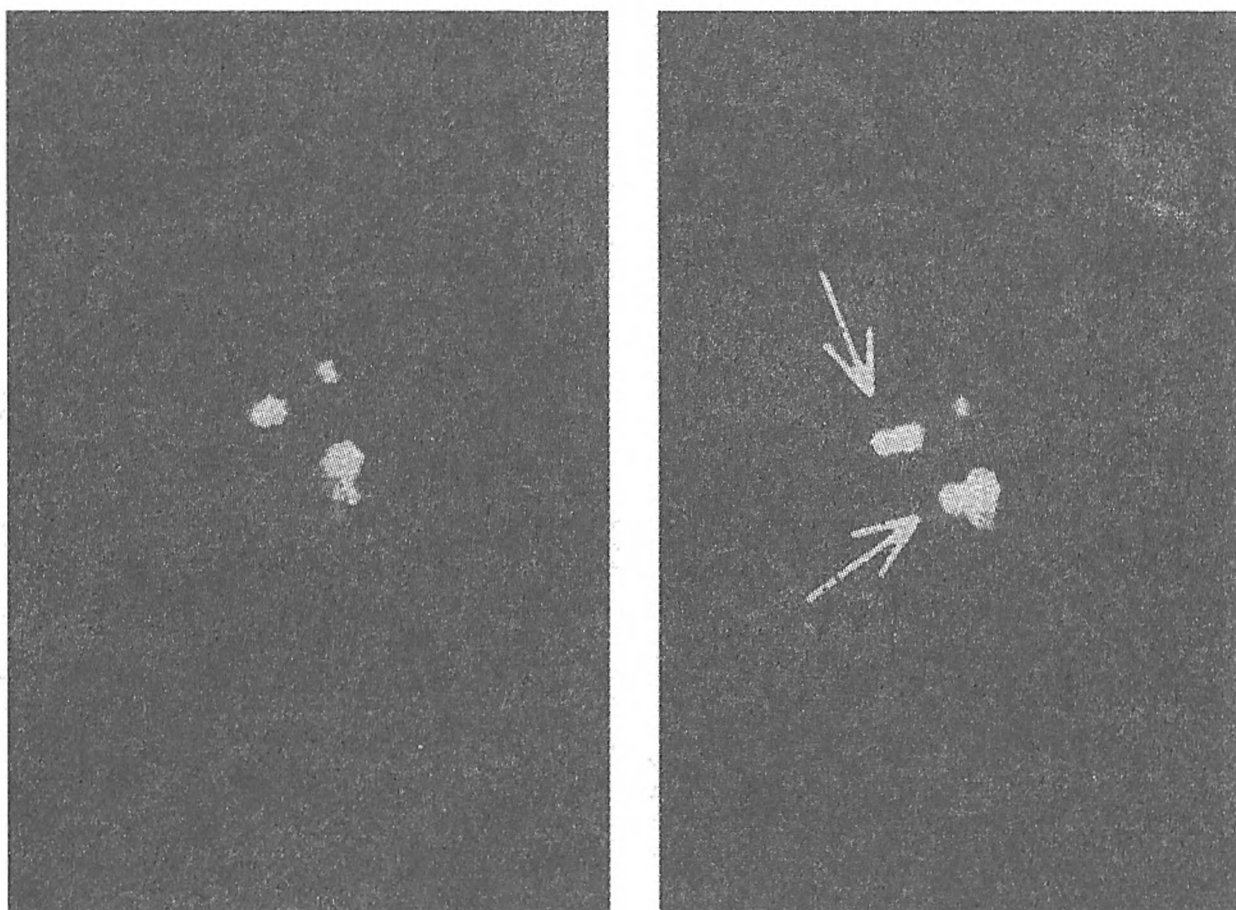


*Fig. 5.12.* Formarea unei noi stele?

trebuie acoperit pentru a elimina aerul, trebuie să ne asigurăm că nu e încărcat electric și așa mai departe; în acest caz forța poate fi măsurată. Ea a fost măsurată întâia oară de Cavendish cu un aparat care e prezentat schematic în figura 5.13. Astfel s-a demonstrat pentru prima dată existența unei forțe directe dintre două bile mari de plumb fixe și două bile de plumb mai mici, de la capetele unui braț susținut de un fir foarte subțire, numit fir de torsiune. Măsurând cât de mult se răsucește firul, se poate verifica faptul că forța e invers proporțională cu pătratul distanței și determina valoarea ei. Așadar, se poate măsura precis coeficientul $G$ din formula

$$F = G\frac{mm'}{r^2}$$

căci toate masele și distanțele sunt cunoscute. Veți spune: „Am fi putut determina pe $G$ considerând cazul Pământului." Da, dar nu cunoaștem *masa* Pământului. Aflându-l pe $G$ din această experiență și știind cât de puternică este atracția

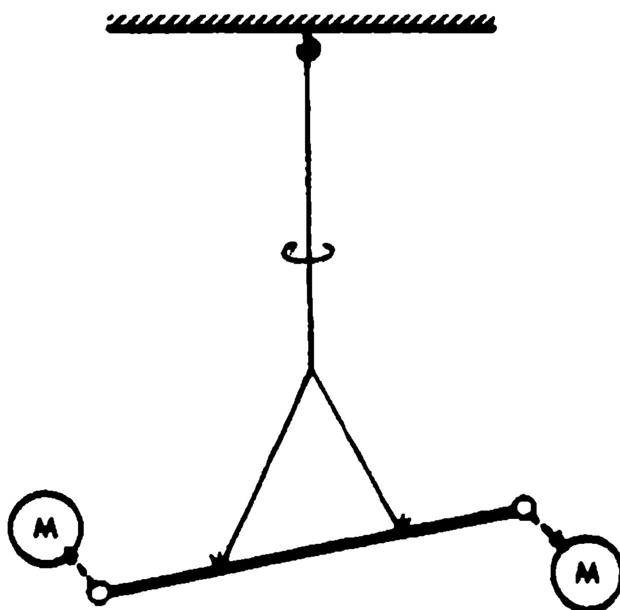



*Fig. 5.13.* O schiţă a aparatului folosit de Cavendish pentru a verifica legea atracţiei universale în cazul obiectelor mici şi a măsura constanta gravitaţională *G*

Pământului, putem afla indirect cât de mare este masa Pământului! Această experienţă a fost numită „cântărirea Pământului". Cavendish pretindea că el cântăreşte Pământul, dar ceea ce măsura era coeficientul *G* din legea gravitaţiei. Aceasta e singura cale prin care poate fi determinată masa Pământului. *G* se dovedeşte a fi egal cu

$$6{,}670 \times 10^{-11} \text{ newton} \times \text{m}^2/\text{kg}^2.$$

Este greu de redat importanţa efectului produs asupra istoriei ştiinţei de acest mare succes al teoriei gravitaţiei. Comparaţi confuzia, lipsa de încredere, cunoaşterea incompletă care domneau în secolele precedente (când existau nesfârşite dezbateri şi paradoxuri) cu claritatea şi simplitatea acestei legi — acest fapt că toate planetele, sateliţii şi stelele au o *regulă* atât de *simplă* care le guvernează. Mai mult, apreciaţi faptul că omul a putut s-o *înţeleagă* şi să deducă felul în care trebuie să se mişte planetele! Acesta este motivul succesului ştiinţelor în anii următori, căci ea a dat omului speranţa că şi alte fenomene ale lumii ar putea avea asemenea legi frumoase şi simple.

## Ce este gravitaţia ?

Este însă aceasta o lege atât de simplă ? Ce putem spune despre mecanismul ei ? Tot ce am făcut este să descriem *cum* se mişcă Pământul în jurul Soarelui, dar nu am spus nimic despre *ce anume face ca legea să funcţioneze.* Newton nu a făcut ipoteze în privinţa asta; el s-a mulţumit să găsească *ce* face gravitaţia, fără a intra în mecanismul ei. *Nimeni nu a explicat până acum mecanismul.* Este tipic pentru legile fizicii faptul că ele au acest caracter abstract. Legea conservării energiei este o teoremă privind cantităţi care trebuie calculate şi adunate la un loc, fără vreo explicaţie asupra mecanismului şi, de asemenea, marile legi ale mecanicii sunt legi matematice cantitative pentru care nu avem la îndemână vreun mecanism. De ce putem folosi matematica pentru a descrie natura, fără un mecanism în spatele său ? Nimeni nu ştie. Dar trebuie să mergem mai departe, pentru că pe această cale aflăm lucruri noi.

Au fost propuse multe mecanisme pentru gravitaţie. E interesant de considerat unul dintre acestea, la care mulţi oameni s-au gândit de la o epocă la alta. Când îl „descoperi" eşti emoţionat şi încrezător, dar îţi dai imediat seama că nu este corect. El a fost descoperit prima dată pe la 1750. Închipuiţi-vă că ar exista multe particule mişcându-se prin spaţiu cu o viteză foarte mare în toate direcţiile, particule slab absorbite când străbat materia. Când *sunt* absorbite, ele dau un impuls Pământului. Totuşi, întrucât numărul celor care se deplasează într-o direcţie e acelaşi cu numărul celor care se deplasează în direcţia opusă, toate impulsurile se echilibrează. Dar dacă Soarele se află în apropiere, particulele care se îndreaptă către Pământ dinspre Soare sunt parţial absorbite, astfel că dinspre Soare sosesc mai puţine decât din direcţia opusă. Aşadar, Pământul resimte un impuls net către Soare şi nu e greu de văzut că el este invers proporţional

cu pătratul distanței — din cauza variației cu distanța a unghiului solid pe care îl subîntinde Soarele. Ce e greșit în acest mecanism? El implică unele consecințe care *nu sunt adevărate*. Această idee prezintă următoarea dificultate: Pământul, mișcându-se în jurul Soarelui, s-ar izbi de mai multe particule sosind din față decât din spate (când alergați prin ploaie, vă plouă mai tare pe față decât pe ceafă!). Prin urmare, Pământul ar primi un impuls mai mare din față și resimți o *rezistență la înaintare* care i-ar încetini mișcarea pe orbită. Se poate calcula cât timp i-ar trebui Pământului ca să se oprească drept rezultat al acestei rezistențe, și de fapt ar fi trebuit ca Pământul să se fi oprit deja, așa încât acest mecanism nu e bun. Nu a fost niciodată imaginat vreun mecanism care să „explice" gravitația și care să nu prezică de asemenea alte fenomene *inexistente*.

Vom examina în continuare posibilitatea unei legături între gravitație și alte forțe. Nu există în prezent vreo explicație a gravitației în termenii altor forțe. Ea nu este un aspect al electricității sau al unui alt fenomen asemănător, astfel că nu avem la dispoziție nici o explicație. Totuși, gravitația și alte forțe sunt foarte asemănătoare și e interesant de observat analogii. De exemplu, forța electrică dintre două corpuri încărcate electric arată exact ca legea gravitației: forța electrică este egală cu minus o constantă înmulțită cu produsul sarcinilor și variază invers proporțional cu pătratul distanței. În cazul a două sarcini de același semn, avem o forță de respingere. Dar nu este totuși remarcabil că cele două legi implică aceeași variație cu distanța? Poate că gravitația și electricitatea sunt mult mai strâns legate decât ne închipuim. Au fost făcute multe încercări de a le unifica; așa-numita teorie unificată a câmpului este o foarte elegantă încercare de a combina electricitatea și gravitația. Comparând gravitația și electricitatea, cel mai interesant lucru este *tăria relativă* a forțelor. Orice teorie care le conține pe

amândouă trebuie de asemenea să prezică tăria gravitaţiei (constanta $G$).

Dacă considerăm, în anumite unităţi de măsură naturale, respingerea dintre doi electroni (sarcina universală din natură) datorată electricităţii şi atracţia dintre doi electroni datorată maselor lor, putem măsura raportul respingerii electrice faţă de atracţia gravitaţională. Raportul este independent de distanţă şi reprezintă o constantă fundamentală a naturii; el este prezentat în figura 5.14. Raportul dintre atracţia gravitaţională şi respingerea electrică dintre doi electroni este egal cu 1 împărţit la $4{,}17 \times 10^{42}$! Întrebarea care se pune este de unde provine un număr atât de mare? El nu este accidental, ca raportul dintre volumul Pământului şi volumul unui purice! Am considerat două aspecte naturale ale aceluiaşi lucru, electronul. Acest număr fantastic este o constantă naturală, astfel că el implică ceva profund din natură. De unde ar putea proveni un număr atât de nemaipomenit? Unii spun că vom găsi într-o bună zi „ecuaţia universală“, iar una din rădăcinile ei va fi acest număr. E foarte greu de găsit o ecuaţie pentru care un număr aşa de fantastic să fie o rădăcină naturală. Au fost imaginate alte posibilităţi; una este de a-l lega de vârsta universului. E limpde că trebuie să găsim *alt* număr uriaş pe undeva. Dar ne re-

$$\frac{\text{Atracţia gravitaţională}}{\text{Respingerea electrică}} = 1/4{,}17 \times 10^{42}$$

= 1/4,170,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000.

*Fig. 5.14.* Tăriile relative ale interacţiilor electrică şi gravitaţională dintre doi electroni

ferim la vârsta universului exprimată în *ani*? Nu, pentru că anii nu sunt „naturali"; ei au fost născociți de oameni. Drept exemplu pentru ceva natural, să considerăm timpul care îi trebuie luminii pentru a traversa un proton, $10^{-24}$ secunde. Dacă comparăm acest timp cu *vârsta universului*, $2 \times 10^{10}$ ani, răspunsul e $10^{-42}$. El are aproximativ același număr de zerouri, ceea ce a condus la propunerea de a lega constanta gravitațională de vârsta universului. Dacă așa stau lucrurile, constanta gravitațională s-ar modifica cu timpul, pentru că pe măsură ce universul îmbătrânește raportul dintre vârsta universului și timpul care îi trebuie luminii pentru a traversa un proton ar crește treptat. Este posibil ca *într-adevăr* constanta gravitațională să varieze cu timpul? Desigur, modificările ar fi atât de lente încât e foarte greu s-o afirmăm cu certitudine.

Un test la care ne putem gândi este de a determina ce efect ar fi avut o asemenea schimbare în decursul ultimilor $10^9$ ani, care reprezintă aproximativ timpul de când a apărut viața pe Pământ și totodată o zecime din vârsta universului. În acest timp, constanta gravitațională ar fi crescut cu aproximativ 10%. Dacă luăm în considerare structura Soarelui — bilanțul dintre masa sa și generarea treptată a energiei radiante în interiorul său —, putem deduce că, în cazul în care gravitația ar fi fost cu 10% mai puternică, Soarele n-ar fi fost doar cu 10% mai strălucitor, ci cu mult mai mult — cu un factor reprezentând *puterea a șasea* a constantei gravitaționale! Calculând ce se întâmplă cu orbita Pământului prin modificarea gravitației, găsim că Pământul se afla pe atunci *mai aproape* de Soare. Una peste alta, Pământul ar fi fost cu 100 de grade mai fierbinte, iar toată apa nu s-ar mai fi găsit în mare, ci ca vapori în aer, astfel încât viața nu ar fi început în mare. Prin urmare, astăzi *nu* credem că constanta gravitațională se modifică odată cu vârsta universului. Dar argumente de genul celui de mai sus

nu sunt foarte convingătoare, iar problema nu e definitiv închisă.

Este un fapt cunoscut că forța gravitației e proporțională cu *masa*, cantitatea ce reprezintă în mod fundamental o măsură a *inerției* — cu alte cuvinte, cât de tare trebuie să tragi de ceva care se învârte pe un cerc. Așadar, două obiecte, unul greu iar celălalt ușor, rotindu-se în jurul unui obiect mai mare, pe același cerc, cu aceeași viteză, sub influența gravitației își vor păstra pozițiile relative, fiindcă mișcarea circulară *necesită* o forță mai mare pentru o masă mai mare *exact în proporția necesară* pentru ca cele două obiecte să-și păstreze pozițiile relative. Dacă un obiect se află în interiorul celuilalt, el va rămâne înăuntru; este un echilibru perfect. Deci Gagarin sau Titov au găsit că obiectele sunt „fără greutate“ înăuntrul navei spațiale; dacă li s-ar fi întâmplat să dea drumul la o bucată de cretă, de exemplu, ea s-ar fi învârtit în jurul Pământului în exact același mod ca întreaga navă spațială, iar astfel ar fi părut că rămâne suspendată în spațiu în fața lor. E foarte interesant faptul că această forță este cu mare precizie *exact* proporțională cu masa, pentru că, dacă nu ar fi exact proporțională, ar trebui să existe un efect în care inerția și greutatea să difere. Absența unui asemenea efect a fost verificată cu mare precizie printr-o experiență făcută prima dată de Eötvös în 1909 și, mai recent, de Dicke. Pentru toate substanțele încercate, masele și greutățile sunt exact proporționale, cu o precizie de $1/10^9$ și chiar mai mult. Iată o experiență remarcabilă.

## Gravitație și relativitate

Un alt subiect care merită discutat este modificarea adusă de Einstein la legea gravitației a lui Newton. În ciuda faimei sale, legea lui Newton nu e corectă! Ea a fost modificată

de Einstein pentru a ține seama de teoria relativității. După Newton, efectul gravitațional este instantaneu, adică dacă ar fi să mișcăm o masă am simți *imediat* o forță modificată din cauza noii poziții a acelei mase; prin asemenea mijloace am putea trimite semnale cu viteză infinită. Einstein a adus argumente care sugerează că *nu putem trimite semnale mai rapide decât viteza luminii*, așa încât legea gravitației nu poate fi corectă. Corectând-o pentru a ține seama de întârzieri, obținem o nouă lege, legea lui Einstein despre gravitație. O trăsătură a acestei noi legi, foarte ușor de înțeles, este următoarea: în teoria relativității a lui Einstein, tot ce conține *energie* are totodată și masă — masă în sensul că este atras gravitațional. Chiar lumina, care are o energie, are o „masă". Când un fascicul de lumină, care conține el, trece pe lângă Soare, exista o atracție asupra sa din partea Soarelui. Așadar, lumina nu merge drept, ci e deviată. În timpul unei eclipse de Soare, de exemplu, stelele din jurul lui trebuie să apară deplasate față de poziția unde s-ar fi aflat dacă Soarele nu ar fi acolo, fapt care s-a și observat.

Să încheiem făcând o comparație între gravitație și alte teorii. În anii din urmă am descoperit că întreaga materie este alcătuită din particule minuscule și că există mai multe feluri de interacții, precum forțele nucleare etc. Nici una dintre aceste forțe, nucleare sau electrice, nu poate explica deocamdată gravitația. Aspectele cuantice ale naturii nu au fost încă extinse la gravitație. Când scara este atât de mică încât trebuie să luăm în considerare efectele cuantice, efectele gravitaționale sunt atât de slabe încât nu a apărut pentru moment nevoia unei teorii cuantice a gravitației. Pe de altă parte, pentru completitudinea teoriilor noastre fizice ar fi important să vedem dacă legea lui Newton, modificată de Einstein, ar putea fi modificată mai departe pentru a fi pusă în acord cu principiul de incertitudine. Această ultimă modificare nu a fost deocamdată înfăptuită.

# 6
# Comportarea cuantică

## Mecanică atomică

În ultimele capitole am prezentat ideile esențiale necesare pentru înțelegerea celor mai importante fenomene legate de lumină — sau, în general, de radiația electromagnetică. Ne-am ocupat cu ceea ce se numește „teroria clasică“ a undelor electromagnetice, care se dovedește a fi o descriere perfect adecvată a naturii în cazul unui mare număr de efecte. Până acum nu ne-a preocupat faptul că energia luminoasă sosește în porții numite „fotoni“.

Următorul subiect pe care vrem să-l abordăm este problema comportării unor fragmente relativ mari de materie — proprietățile lor mecanice și termice, de pildă. În acest domeniu, vom constata că teoria „clasică“ (sau cea veche) dă greș pentru că materia e în realitate alcătuită din particule de dimensiuni atomice. Ne vom ocupa pentru moment însă doar de partea clasică, fiindcă e singura parte pe care o putem înțelege folosind mecanica clasică pe care am învățat-o. Numai că nu vom avea prea mult succes. Vom descoperi că în cazul materiei, spre deosebire de cazul luminii, vom fi relativ curând puși în dificultate. Am putea, desigur, ocoli mereu efectele atomice, dar în acest punct vom intercala o scurtă digresiune în care vom prezenta ideile de bază ale

proprietăţilor cuantice ale materiei, altfel spus ideile cuantice ale fizicii atomice, aşa încât să ne formăm o imagine despre acele lucruri pe care le vom lăsa deoparte, căci există aspecte importante pe care va trebui să le lăsăm deoparte.

În cele ce urmează vom da deci o *introducere* în mecanica cuantică, dar nu vom putea intra cu adevărat în subiect decât mult mai târziu.

„Mecanica cuantică“ este descrierea comportării materiei în toate detaliile sale şi, în particular, a evenimentelor la scară atomică. La o scară foarte mică lucrurile se comportă altfel decât toate lucrurile în privinţa cărora aveţi o experienţă directă. Nu se comportă ca undele, nu se comportă ca particulele, nu se comportă ca norii, ca bilele de biliard, ca greutăţile aşezate pe arcuri sau ca orice aţi văzut vreodată.

Newton credea că lumina e compusă din particule, dar apoi s-a descoperit că ea se comportă ca o undă. Mai târziu însă (la începutul secolului XX), s-a aflat că lumina se comportă totuşi ca o particulă. Din punct de vedere istoric, despre electron, de pildă, s-a crezut că se comportă ca o particulă, iar apoi s-a descoperit că în multe privinţe se comportă ca o undă. În realitate, nu se comportă nici ca o undă, nici ca o particulă. În prezent am renunţat la comparaţii. Spunem: „Este ca *nici una*“.

Totuşi, există aici din fericire o breşă — electronii se comportă ca lumina. Comportarea cuantică a obiectelor atomice (electroni, protoni, neutroni, fotoni ş.a.m.d.) este aceeaşi pentru toate; ele sunt toate „unde de particulă“ sau cum vreţi să le numiţi. Aşa încât ceea ce învăţăm despre proprietăţile electronilor (pe care îi vom folosi în exemplele noastre) se va aplica de asemenea tuturor „particulelor“, inclusiv fotonilor de lumină.

Acumularea treptată de informaţii despre comportarea atomică şi la scară mică din primul sfert al acestui veac, care au dat câteva indicii despre felul în care se comportă lucru-

rile mici, a produs o confuzie crescândă, confuzie risipită în cele din urmă în 1926 și 1927 de Schrödinger, Heisenberg și Born. Ei au obținut finalmente o descriere coerentă a comportării materiei la scară mică. Vom rezuma în acest capitol aspectele principale ale acestei descrieri.

Deoarece comportarea atomică e atât de diferită de experiența curentă, este foarte greu să ne obișnuim cu ea; ea pare bizară și misterioasă oricui — atât neinițiatului, cât și fizicianului încercat. Nici măcar specialiștii n-o înțeleg așa cum ar dori, și este perfect normal să n-o înțeleagă, din moment ce tot ce ține de experiența umană directă și de intuiția umană se aplică obiectelor de dimensiuni mari. Știm cum se vor comporta obiectele mari, dar la scară mică lucrurile pur și simplu nu se comportă așa. Trebuie deci să ne apropiem de ele pe o cale abstractă, făcând apel la intuiție, fără a face legături cu experiența noastră directă.

În acest capitol vom aborda imediat elementul fundamental al comportării misterioase în forma sa cea mai ciudată. Vom examina un fenomen imposibil, *absolut* imposibil de explicat pe orice cale clasică, și care poartă în sine esența mecanicii cuantice. În realitate, el conține *singurul* mister. Nu putem explica misterul, în sensul că nu putem „explica" felul în care funcționează. Vom *descrie* doar cum funcționează. Această descriere va presupune prezentarea trăsăturilor fundamentale ale întregii mecanici cuantice.

## O experiență cu gloanțe

Pentru a încerca să înțelegem comportarea cuantică a electronilor într-o anumită situație experimentală, o vom compara cu comportarea — mai familiară nouă — a particulelor (cum ar fi gloanțele) și a undelor (de exemplu undele de la suprafața apei). Să considerăm mai întâi cum se comportă

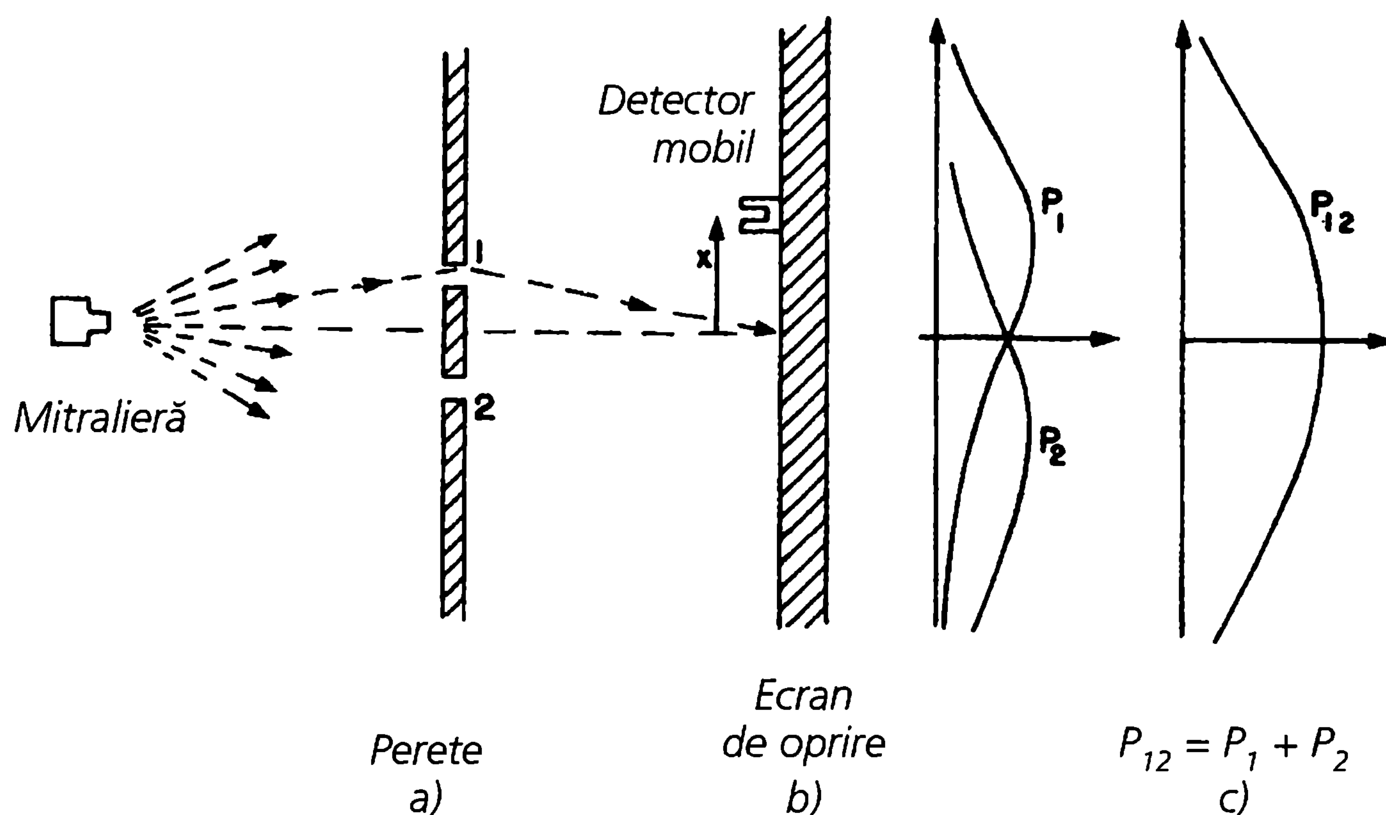



*Fig. 6.1.* Experienţă de interferenţă cu gloanţe

gloanţele în experienţa prezentată schematic în figura 6.1. Avem o mitralieră care trage un şuvoi de gloanţe. Nu e o armă prea bună, căci împrăştie gloanţele (la întâmplare) într-un unghi destul de mare, după cum rezultă din figură. În faţa armei avem un perete (făcut dintr-o placă blindată), cu două orificii exact atât de mari cât trebuie pentru a lăsa să treacă un glonţ. În spatele peretelui se află un ecran (un perete gros de lemn, să zicem) care va „absorbi" gloanţele care îl lovesc. În faţa peretelui avem un obiect pe care îl vom numi „detector" de gloanţe, de pildă o cutie cu nisip. Orice glonţ care intră în detector va fi oprit şi captat. Când dorim, putem goli cutia şi număra gloanţele adunate. Detectorul poate fi deplasat într-o parte şi într-alta în direcţia pe care o vom numi *x*. Cu ajutorul acestui aparat putem găsi experimental răspunsul la întrebarea: „Care e probabilitatea ca un glonţ care trece prin orificiile din perete să sosească pe ecranul din spate la distanţa *x* de centru ?" Mai întâi, trebuie să înţelegeţi că nu putem vorbi decât în termeni de probabilităţi, fiindcă nu ştim precis încotro se va îndrepta un anumit glonţ. Un glonţ care se întâmplă să

treacă printr-unul din orificii poate ricoşa pe marginea orificiului şi poate ajunge în orice punct al ecranului. Prin „probabilitate“ înţelegem şansa ca glonţul să ajungă în detector; o putem măsura numărând câte gloanţe sosesc în detector într-un anumit timp şi făcând apoi raportul dintre acest număr şi numărul *total* de gloanţe care au lovit ecranul în acelaşi timp. Sau, dacă presupunem că arma trage mereu în acelaşi ritm în tot timpul măsurătorilor, probabilitatea căutată va fi proporţională cu numărul de gloanţe care ajung la detector într-un anumit interval de timp.

Pentru scopul urmărit aici ar trebui să ne imaginăm o experienţă oarecum idealizată, în care nu avem gloanţe reale, ci gloanţe *indestructibile*, care nu se pot rupe în bucăţi. În experienţa noastră vom constata deci că gloanţele sosesc întotdeauna întregi în detector. Dacă ritmul în care trage mitraliera este foarte rar, constatăm că, într-un interval scurt de timp, fie nu ajunge nimic pe ecran, fie soseşte un glonţ şi numai unul singur. Bineînţeles, dimensiunea gloanţelor nu depinde de ritmul în care trage arma. Vom spune: „Gloanţele sosesc *întotdeauna* sub forma unor bucăţi identice.“ Ceea ce măsurăm cu detectorul nostru este probabilitatea de sosire a unei „bucăţi“; această probabilitate o măsurăm ca funcţie de $x$. Rezultatul unor astfel de măsurători efectuate cu acest aparat (în realitate, nu am făcut experienţa, ci ne imaginăm rezultatul) este reprezentat în graficul din figura 6.1 (c). Pe grafic, axa probabilităţii este orientată spre dreapta, iar axa $x$ este verticală, astfel încât să corespundă poziţiei ecranului. Notăm probabilitatea cu $P_{12}$, fiindcă gloanţele au putut trece fie prin orificiul 1, fie prin orificiul 2. Nu e de mirare faptul că $P_{12}$ este mare în partea centrală a graficului şi scade dacă $x$ e foarte mare. Vă puteţi însă întreba de ce $P_{12}$ are valoarea maximă tocmai în punctul $x = 0$. Putem înţelege acest lucru dacă repetăm experienţa, după ce am acoperit orificiul 2, iar apoi o mai repetăm o dată,

acoperind orificiul 1. Când orificiul 2 e acoperit, gloanțele pot trece numai prin orificiul 1 și obținem curba notată $P_1$ în partea (b) a figurii. Așa cum vă așteptați, maximul lui $P_1$ apare la o valoare a lui $x$ care se află pe dreapta ce unește arma cu orificiul 1. Când e închis orificiul 1, obținem curba simetrică $P_2$ din figură, care e distribuția de probabilitate pentru gloanțele ce trec prin orificiul 2. Comparând părțile (b) și (c) ale figurii 6.1, găsim rezultatul important.

$$P_{12} = P_1 + P_2 \tag{6.1}$$

Probabilitățile se adună pur și simplu. Când sunt deschise ambele orificii, efectul e egal cu suma efectelor obținute deschizând numai câte un singur orificiu. Dintr-un motiv pe care îl veți afla mai târziu, vom caracteriza situația ca fiind *„fără interferență"*. Atât despre gloanțe. Ele sosesc în „bucăți", iar probabilitatea lor de sosire nu prezintă interferență.

## O EXPERIENȚĂ CU UNDE

Vrem acum să considerăm o experiență cu unde pe suprafața apei. Aparatul este prezentat schematic în figura 6.2. Avem un vas puțin adânc, umplut cu apă. Un obiect mic numit „sursă de unde" este făcut să vibreze în sus și în jos de către un motor și produce unde circulare. În dreapta sursei avem iarăși un perete cu două orificii, iar dincolo de acesta se află un al doilea perete care, pentru simplitate, e „absorbant", astfel încât undele care sosesc aici nu se reflectă. El poate fi realizat sub forma unei „plaje" în pantă. În fața plajei așezăm un detector care poate fi deplasat în sus și în jos, la fel ca în cazul precedent. De astă dată detectorul e un dispozitiv care măsoară „intensitatea" mișcării ondulatorii. Vă

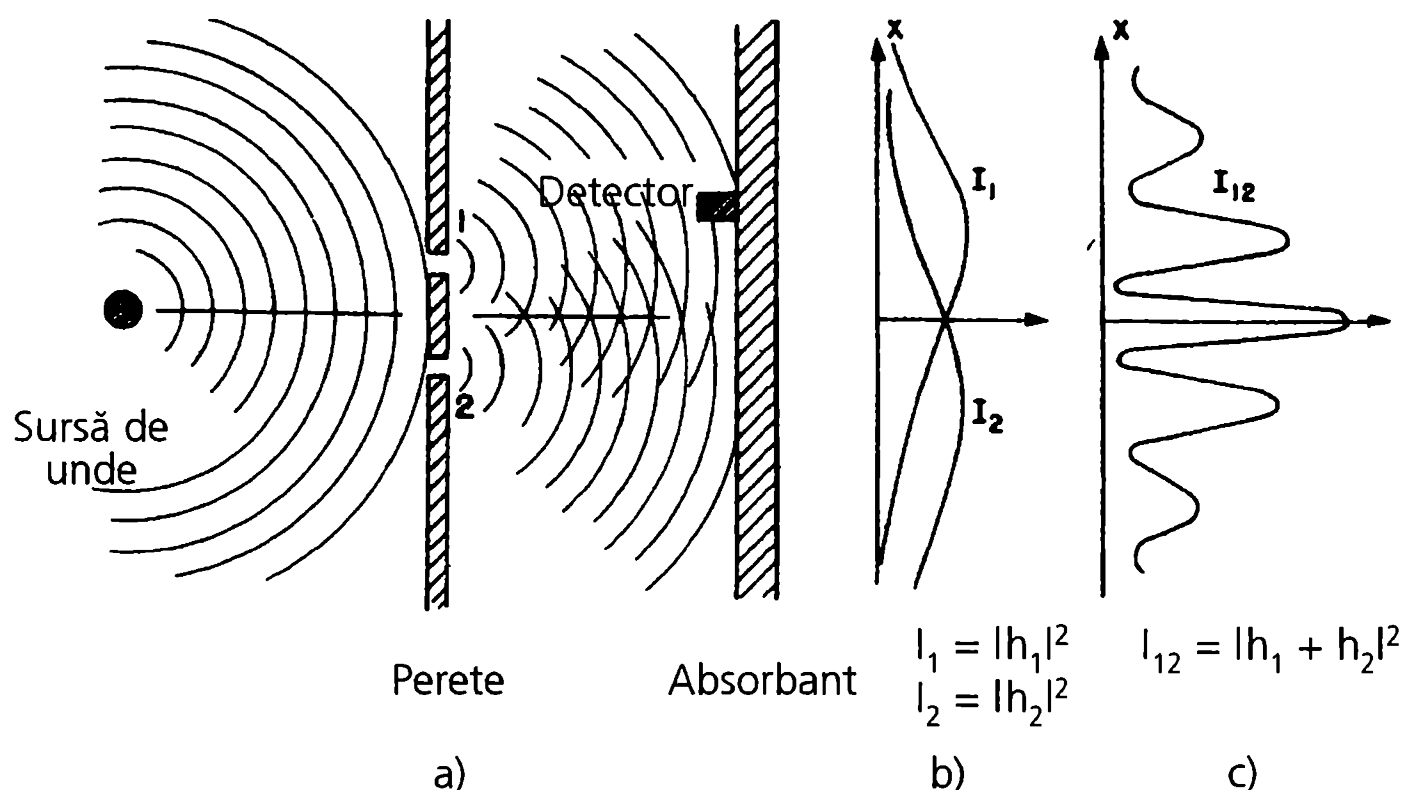



*Fig. 6.2.* Experiență de interferență cu unde la suprafața apei

puteți imagina un dispozitiv care măsoară înălțimea mișcării ondulatorii, dar a cărui scară este etalonată proporțional cu *pătratul* înălțimii, astfel încât indicațiile să fie proporționale cu intensitatea undei. Atunci, indicațiile detectorului nostru sunt proporționale cu *energia* transportată de undă — sau, mai precis, cu energia sosită la detector în unitatea de timp.

Primul lucru de observat la aparatul nostru este că intensitatea poate avea *orice* mărime. Dacă amplitudinea mișcării sursei e foarte mică, mișcarea ondulatorie în punctul unde se află detectorul va fi foarte mică. Când amplitudinea sursei e mai mare, intensitatea la detector este mai mare. Intensitatea undei poate avea așadar orice valoare. Vom spune că intensitatea undei *nu* e măsurată în „bucăți".

Să măsurăm acum intensitatea undei pentru diverse valori ale lui $x$ (menținând constantă mișcarea sursei de unde). Obținem curba interesantă notată cu $I_{12}$ în partea (c) a figurii.

Am calculat deja cum pot apărea asemenea imagini, atunci când am studiat interferența undelor electromagnetice. În cazul de față vom observa că unda inițială e difractată de orificii, de la fiecare dintre ele propagându-se noi unde circulare. Dacă acoperim pe rând câte unul din orificii și măsurăm

distribuţia de intensitate la absorbant, găsim curbele de intensitate destul de simple arătate în partea (b) a figurii. $I_1$ este intensitatea undei sosite de la orificiul 1 atunci când orificiul 2 este închis, iar $I_2$ este intensitatea undei sosite de la orificiul 2 atunci când orificiul 1 e închis.

Intensitatea $I_{12}$, observată când ambele orificii sunt deschise, evident *nu* e egală cu suma lui $I_1$ şi $I_2$. Spunem că avem „interferenţa" celor două unde. În anumite locuri (unde se află maximele curbei $I_{12}$) undele sunt „în fază", iar maximele lor se adună dând o amplitudine mare şi, prin urmare, o intensitate mare. Spunem că în aceste locuri undele „interferă constructiv". Asemenea interferenţe constructive vor exista oriunde distanţa de la detector până la unul din orificii este cu un număr întreg de lungimi de undă mai mare (sau mai mică) decât distanţa de la detector până la celălalt orificiu.

În locurile în care cele două unde ajung la detector cu o diferenţă de fază de $\pi$ (sunt în „opoziţie de fază") mişcarea ondulatorie rezultantă la detector va fi diferenţa celor două amplitudini. Undele „interferă distructiv" şi obţinem o valoare mică pentru intensitatea undei. Astfel de valori mici sunt de aşteptat oriunde distanţa dintre orificiul 1 şi detector diferă de distanţa dintre orificiul 2 şi detector cu un număr impar de jumătăţi de lungime de undă. Valorile mici ale lui $I_{12}$ din figura 6.2 corespund locurilor în care cele două unde interferă distructiv.

Vă amintiţi că relaţia cantitativă dintre $I_1$, $I_2$ şi $I_{12}$ poate fi exprimată în felul următor: înălţimea instantanee a undei la detector poate fi scrisă, pentru unda sosită de la orificiul 1, ca (partea reală a lui) $h_1 e^{i\omega t}$, unde „amplitudinea" $h_1$ este, în general, un număr complex. Intensitatea e proporţională cu media pătratului înălţimii undei sau, dacă utilizăm numere complexe, cu $|h_1|^2$. La fel, pentru orificiul 2, înălţimea este $h_2 e^{i\omega t}$, iar intensitatea e proporţională cu $|h_2|^2$. Când ambele

orificii sunt deschise, înălțimile undelor se adună și dau înălțimea $(h_1+h_2)\,e^{i\omega t}$, iar intensitatea este $|h_1+h_2|^2$. Omițând constanta de proporționalitate (care e neinteresantă pentru scopul urmărit de noi), relațiile corecte pentru undele care *interferă* sunt:

$$I_1=|h_1|^2, \qquad I_2=|h_2|^2, \qquad I_{12} = |h_1+h_2|^2. \tag{6.2}$$

Observați că rezultatul e complet diferit de cel obținut în cazul gloanțelor (formula 6.1). Dezvoltând $|h_1+h_2|^2$ vedem că

$$|h_1+h_2|^2 = |h_1|^2 + |h_2|^2 + 2|h_1||h_2| \cos \delta \tag{6.3}$$

unde $\delta$ e diferența de fază dintre $h_1$ și $h_2$. Introducând intensitățile, rezultatul se scrie

$$I_{12} = I_1+I_2+2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta. \tag{6.4}$$

Ultimul termen din (6.4) este „termenul de interferență". Atât despre undele de la suprafața apei. Intensitatea poate lua orice valoare și ea prezintă fenomenul de interferență.

## O EXPERIENȚĂ CU ELECTRONI

Să ne închipuim acum o experiență similară cu electroni; ea e prezentată schematic în figura 6.3. Construim un „tun electronic" care constă dintr-un filament de tungsten încălzit de un curent electric și înconjurat de o cutie metalică având un orificiu. Dacă filamentul se află la o tensiune negativă față de cutie, electronii emiși vor fi accelerați către pereți și o parte din ei vor trece prin orificiu. Toți electronii care ies din tun vor avea (aproape) aceeași energie. În fața tunului se află

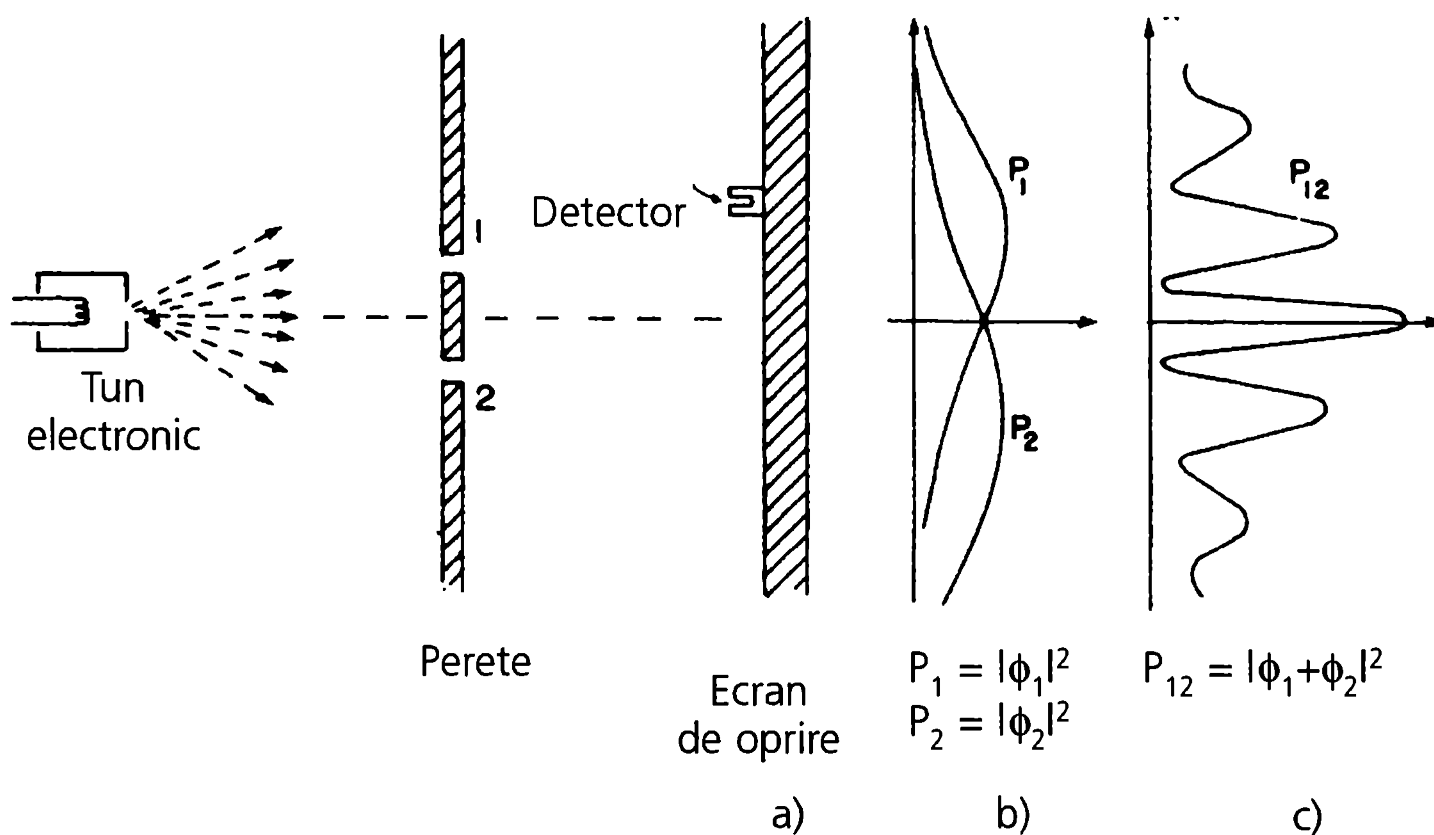



*Fig. 6.3.* Experienţă de interferenţă cu electroni

din nou un perete (o placă subţire de metal) cu două orificii. Dincolo de perete este altă placă servind drept ecran de oprire. În faţa sa aşezăm un detector mobil. Detectorul poate fi un contor Geiger sau, mai bine, un amplificator electronic conectat la un difuzor.

Trebuie să vă avertizăm de la bun început să nu încercaţi să faceţi această experienţă (spre deosebire de celelalte două descrise înainte). Experienţa nu a fost făcută niciodată exact în modul descris; pentru a pune în evidenţă efectele care ne interesează ar trebui construite dispozitive la o scară imposibil de mică. Facem un „experiment mintal“, pe care l-am ales fiindcă e uşor de imaginat. Ştim însă ce rezultate *s-ar* obţine, pentru că *există* multe experienţe care au fost efectuate în realitate, scara şi proporţiile fiind astfel alese încât să fie puse în evidenţă efectele pe care le vom descrie.

Primul lucru pe care îl observăm în experienţa noastră cu electroni este că în detector (adică în difuzor) auzim „tic“-uri distincte, iar toate tic-urile sunt la fel. *Nu* există „jumătăţi de tic“.

Vom observa de asemenea că tic-urile sosesc foarte dezordonat: tic tic-tic... tic tic... tic-tic tic... etc., așa cum funcționează un contor Geiger. Dacă numărăm tic-urile care sosesc într-un timp suficient de lung — de pildă, mai multe minute —, iar apoi le numărăm din nou în alt interval de timp egal, constatăm că cele două numere sunt foarte apropiate. Putem vorbi deci despre *numărul mediu* de tic-uri auzite în unitatea de timp (atâtea tic-uri pe minut, în medie).

Când deplasăm detectorul, *numărul* de tic-uri în unitatea de timp este mai mare sau mai mic, dar mărimea (intensitatea) fiecărui tic e mereu aceeași. Dacă micșorăm temperatura filamentului din tunul electronic, ritmul în care se succed tic-urile scade, dar fiecare tic continuă să se audă la fel. Mai observăm că, dacă așezăm în fața ecranului de oprire doi detectori separați, vom auzi un tic în unul *sau* în celălalt detector, dar niciodată în amândoi simultan. (Cu excepția cazului în care, din când în când, vor exista două tic-uri foarte apropiate în timp, iar urechea noastră se poate să nu le distingă separat.) Tragem deci concluzia că, orice ar fi acel lucru ajunge la ecranul de oprire, ajunge în „bucăți". Toate „bucățile" au aceeași mărime: la ecranul de oprire sosesc numai „bucăți" întregi, iar ele sosesc una câte una. Vom spune: „Electronii sosesc întotdeauna în bucăți identice."

La fel ca în experiența noastră cu gloanțe, putem căuta pe cale experimentală răspunsul la întrebarea: „Care este probabilitatea relativă ca o « bucată » (un electron) să ajungă la ecranul de oprire la diverse distanțe $x$ de centru?" Ca și în primul caz, obținem probabilitatea relativă observând numărul de tic-uri pe unitatea de timp, menținând constante condițiile în care funcționează tunul electronic. Probabilitatea ca electronii să sosească la un anumit $x$ este proporțională cu numărul mediu de tic-uri pe unitatea de timp corespunzând acelui $x$.

Rezultatul experienţei noastre e curba interesantă notată cu $P_{12}$ în partea (c) a figurii 6.3. Da! Aşa se petrec lucrurile cu electronii.

## INTERFERENŢA UNDELOR ELECTRONICE

Să încercăm să analizăm acum curba din figura 6.3 pentru a vedea dacă putem înţelege comportarea electronilor. Primul lucru pe care l-am spune este că, întrucât ei sosesc în formă de bucăţi, fiecare bucată, pe care în definitiv putem s-o numim un electron, a trecut fie prin orificiul 1, fie prin orificiul 2. Să scriem aceasta sub forma unei „propoziţii":

*Propoziţia A:* Fiecare electron trece *fie* prin orificiul 1, *fie* prin orificiul 2.

Presupunând că Propoziţia A e adevărată, toţi electronii care sosesc pe ecranul de oprire pot fi împărţiţi în două clase: (1) cei care sosesc prin orificiul 1 şi (2) cei care sosesc prin orificiul 2. Deci curba observată trebuie să fie suma efectelor electronilor care sosesc prin orificiul 1 şi a electronilor care sosesc prin orificiul 2. Să verificăm experimental această idee. Mai întâi, vom face o măsurătoare pentru electronii care sosesc prin orificiul 1: acoperim orificiul 2 şi numărăm tic-urile din detector. Din numărul de tic-uri pe unitatea de timp obţinem $P_1$. Rezultatul măsurătorii e dat de curba notată $P_1$ în partea (b) a figurii 6.3. Rezultatul pare logic. În mod asemănător măsurăm pe $P_2$ distribuţia probabilităţii pentru electronii care sosesc prin orificiul 2. Rezultatul acestei măsurători este de asemenea prezentat în figură.

E clar că rezultatul $P_{12}$ obţinut cu *ambele* orificii deschise nu e suma lui $P_1$ şi $P_2$, probabilităţile pentru fiecare orificiu în parte. Prin analogie cu experienţa noastră cu unde pe suprafaţa apei, spunem: „Există interferenţă."

*Pentru electroni:* $P_{12} \neq P_1 + P_2$ (6.5)

Cum poate apărea o astfel de interferență ? Poate că trebuie să spunem: „Asta înseamnă, probabil, că *nu e adevărat* că electronii trec sau prin orificiul 1, sau prin orificiul 2, fiindcă dacă ar fi așa, probabilitatea ar trebui să se adune. Poate că ei se mișcă într-un mod mai complicat. Se rup în două și..." Dar nu ! Nu se pot rupe, ei sosesc totdeauna sub formă de bucăți întregi... „Atunci, poate că unii dintre ei trec prin 1, apoi se întorc înapoi prin 2, și așa mai departe de mai multe ori, sau urmează alt drum complicat; atunci, închizând orificiul 2 am modificat șansa ca un electron care a *trecut inițial* prin orificiul 1 să ajungă în cele din urmă la ecranul de oprire..." Atenție însă ! Există unele puncte unde sosesc foarte puțini electroni când sunt deschise *ambele* orificii, dar care primesc mulți electroni dacă închidem unul din orificii; deci închiderea unuia a făcut să *crească* numărul electronilor care trec prin celălalt. Observați însă că în centrul figurii $P_{12}$ este mai mare decât de două ori suma $P_1 + P_2$. Este ca și cum închiderea unui orificiu ar face să *descrească* numărul electronilor care trec prin celălalt. Pare foarte greu de explicat *ambele* efecte prin presupunerea că electronii se mișcă pe traiectorii complicate.

Totul e cât se poate de misterios. Și cu cât privești mai atent, cu atât pare mai misterios. Au fost născocite multe idei pentru a se încerca să se explice curba $P_{12}$ prin mișcări complicate ale electronilor individuali trecând prin orificii. Nici una dintre ele nu a reușit însă. Nici una din ele nu poate conduce la curba corectă pentru $P_{12}$ în funcție de $P_1$ și $P_2$.

Totuși, în mod destul de surprinzător, legătura *matematică* dintre $P_1$, $P_2$ și $P_{12}$ este extrem de simplă; căci $P_{12}$ e tocmai curba $I_{12}$ din figura 6.2, iar acea curbă rezultă foarte simplu. Ceea ce se petrece pe ecran se poate descrie cu

ajutorul a două numere complexe pe care le vom numi $\Phi_1$ și $\Phi_2$ (ele sunt, bineînțeles, funcții de $x$). Modulul pătrat al lui $\Phi_1$ ne dă efectul în cazul când e deschis numai orificiul 1; adică $P_1 = |\Phi_1|^2$. Efectul în cazul în care e deschis numai orificiul 2 este dat de $\Phi_2$ în același mod; adică $P_2 = |\Phi_2|^2$. Efectul combinat al celor două orificii este tocmai $P_{12} = |\Phi_1 + \Phi_2|^2$. *Matematica* fenomenului e exact aceeași ca în cazul undelor de pe suprafața apei! (E greu de văzut cum s-ar putea obține un rezultat atât de simplu dintr-o mișcare complicată a electronilor pe traiectorii bizare, trecând încoace și încolo prin orificii.)

Tragem concluzia următoare: electronii sosesc sub forma unor „bucăți“ ca particulele, dar probabilitatea de sosire a acestor bucăți are o distribuție asemănătoare celei a intensității unei unde. Acesta este sensul în care se spune că „electronul se comportă uneori ca o particulă, alteori ca o undă“.

Observăm în treacăt că, atunci când aveam de-a face cu unde clasice, defineam intensitatea ca media în timp a pătratului amplitudinii undei și utilizam numerele complexe ca un artificiu matematic pentru a simplifica analiza. În mecanica cuantică însă, se constată că amplitudinile *trebuie* să fie reprezentate prin numere complexe. Numai părțile reale nu sunt suficiente. Acesta este, deocamdată, un amănunt tehnic, întrucât formulele arată exact la fel.

Din moment ce probabilitatea de sosire prin ambele orificii se obține atât de simplu, deși nu e egală cu $(P_1 + P_2)$, asta e într-adevăr tot ce avem de spus. Faptul însă că natura se comportă astfel implică un mare număr de subtilități. Vrem să ilustrăm acum câteva din aceste subtilități. Mai întâi, întrucât numărul de electroni sosiți într-un anumit punct *nu* e egal cu numărul celor care sosesc prin orificiul 1 plus numărul celor care sosesc prin orificiul 2, trebuie, fără îndoială, să tragem concluzia că *Propoziția A este falsă. Nu e* adevărat că electronii trec *fie* prin orificiul 1, fie prin ori-

ficiul 2. Dar această concluzie poate fi verificată prin altă experiență.

## URMĂRIND ELECTRONII

Vom încerca acum următoarea experiență. Adăugăm aparatului nostru pentru electroni o sursă de lumină foarte puternică, așezată în spatele peretelui, între cele două orificii, ca în figura 6.4. Știm că sarcinile electrice împrăștie lumina. Deci, dacă un electron va trece spre detector, indiferent în ce mod, el va împrăștia lumină înspre noi, și vom putea *vedea* încotro merge electronul. Dacă, de exemplu, un electron s-ar mișca pe traiectoria ce trece prin orificiul 2 (traiectorie schițată în figura 6.4), am vedea o scânteie luminoasă venind din vecinătatea punctului notat *A* pe figură. Dacă un electron trece prin orificiul 1 ne vom aștepta să vedem o scânteiere venind din vecinătatea orificiului superior. Dacă s-ar întâmpla să vedem lumină în ambele locuri în același timp, deoarece electronul s-ar fi împărțit în două... Dar mai bine să facem experiența!

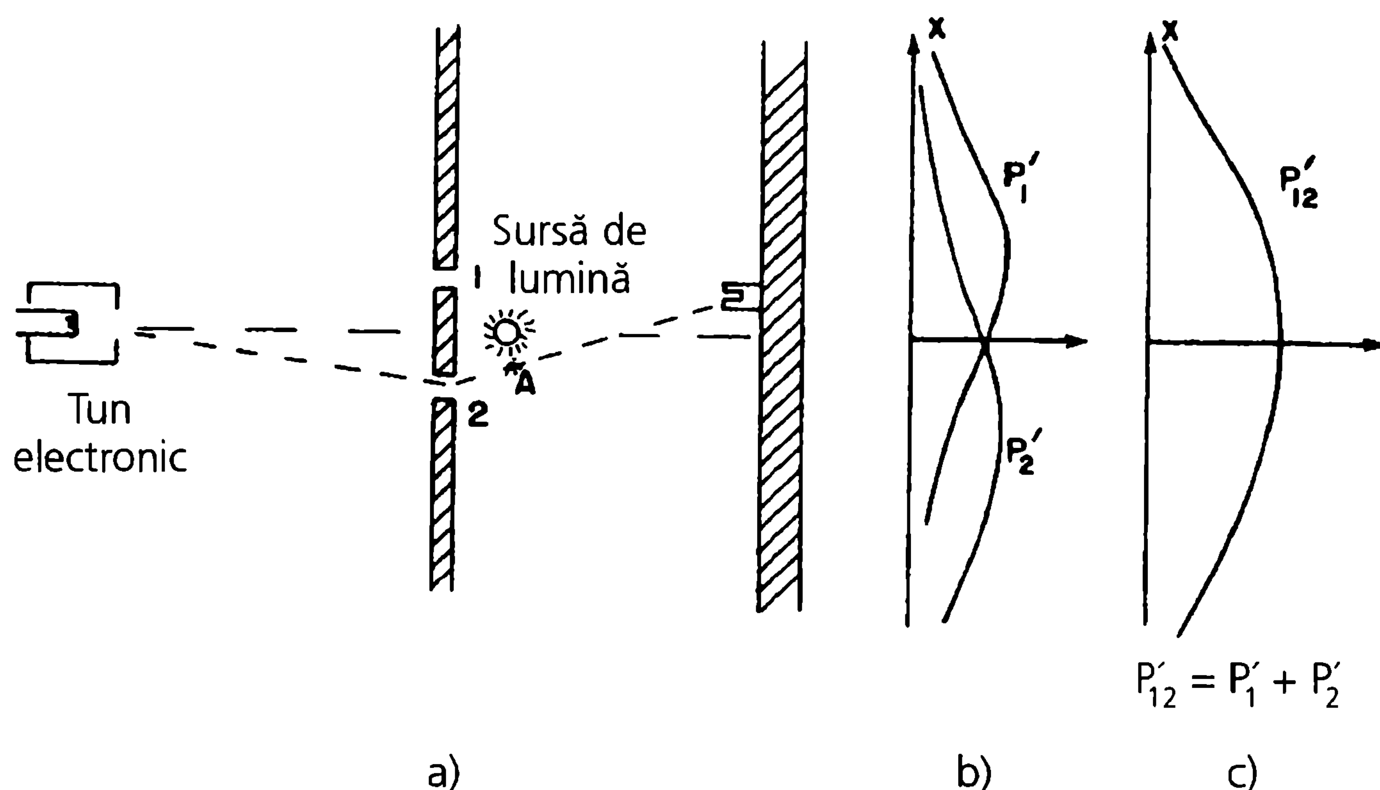



*Fig. 6.4.* Altă experiență cu electroni

Iată ce vedem: de *fiecare* dată când auzim un „tic" în detectorul nostru de electroni (situat lângă ecranul de oprire) *vedem şi o* scânteie de lumină, *fie* în vecinătatea orificiului 1, *fie* în vecinătatea orificiului 2, dar *niciodată în ambele locuri simultan*! Se obţine acelaşi rezultat, indiferent unde aşezăm detectorul. Din această observaţie deducem că, dacă privim electronii, constatăm că ei trec fie printr-un orificiu, fie prin celălalt. Aşadar, experimental, Propoziţia A este în mod necesar adevărată.

Atunci, ce e greşit în argumentarea noastră *împotriva* Propoziţiei A? De ce nu este $P_{12}$ egal tocmai cu $P_1 + P_2$? Înapoi la experienţă! Să urmărim cum se mişcă electronii şi să aflăm ce fac ei. Pentru fiecare poziţie (pe axa $x$) a detectorului vom număra electronii sosiţi şi *de asemenea* vom nota şi prin ce orificiu au trecut, observând scânteierile. Putem urmări desfăşurarea fenomenului în modul următor: ori de câte ori auzim un „tic" facem un semn în coloana 1 dacă vedem scânteierea în vecinătatea orificiului 1, iar dacă vedem scânteierea în vecinătatea orificiului 2 facem un semn în coloana 2. Fiecare electron care soseşte e înregistrat în una din aceste două categorii: cei care sosesc prin 1 şi cei care sosesc prin 2. Din numărul înregistrat în coloana 1 obţinem probabilitatea $P'_1$ ca un electron să ajungă la detector trecând prin orificiul 1; din numărul înregistrat în coloana 2 obţinem probabilitatea $P'_2$ ca un electron să ajungă la detector trecând prin orificiul 2. Dacă repetăm o astfel de măsurătoare pentru multe valori ale lui $x$, obţinem curbele $P'_1$ şi $P'_2$ arătate în partea (b) a figurii 6.4.

Dar acest rezultat nu e deloc surprinzător! Obţinem pentru $P'_1$ ceva foarte asemănător cu ceea ce am obţinut înainte pentru $P_1$, închizând orificiul 2; iar $P'_2$ e asemănător cu ceea ce am obţinut închizând orificiul 1. Deci *nu* există nici o complicaţie de genul trecerii prin ambele orificii. Când îi urmărim, electronii se comportă aşa cum ne aşteptăm. In-

diferent dacă orificiile sunt închise sau deschise, cei pe care îi vedem că sosesc prin orificiul 1 sunt distribuiți în același mod, indiferent dacă orificiul 2 este deschis sau închis.

Dar stați! Care este *acum* probabilitatea *totală*, probabilitatea ca un electron să sosească la detector pe oricare din drumuri? Această informație o avem deja. Ne închipuim că nu am privit deloc scânteierile luminoase și amestecăm laolaltă tic-urile detectorului, pe care le separasem în cele două coloane. *Trebuie* doar să *adunăm* numerele. Pentru probabilitatea ca un electron să sosească la ecranul de oprire trecând prin *unul* (oricare) din orificii obținem $P'_{12} = P'_1 + P'_2$. Adică, deși am reușit să observăm prin care orificiu sosesc electronii noștri, nu mai obținem vechea curbă de interferență $P_{12}$, ci o alta, $P'_{12}$, fără interferență. Dacă stingem sursa de lumină, reapare $P_{12}$.

Trebuie să conchidem că *atunci când urmărim electronii,* distribuția lor pe ecran e diferită de distribuția lor când nu îi urmărim. Este oare aprinderea sursei noastre de lumină cauza care perturbă lucrurile? Trebuie ca electronii să fie foarte delicați, iar lumina, când se împrăștie pe electroni, le dă o izbitură care le modifică mișcarea. Știm că, acționând asupra unei sarcini, câmpul electric al luminii exercită o forță asupra ei. Deci poate că trebuie să ne așteptăm ca mișcarea să fie modificată. În orice caz, lumina exercită o mare influență asupra electronilor. Încercând să „urmărim" electronii pe parcurs, le-am modificat mișcarea. Izbitura pe care o suferă electronul când fotonul se ciocnește cu el modifică în *așa fel* mișcarea electronului încât, dacă el *ar fi putut* să ajungă acolo unde $P_{12}$ are un maximum, de astă dată el ajunge unde $P_{12}$ era minim; acesta este motivul pentru care nu mai observăm maximele și minimele de interferență.

Poate că vă gândiți: „Nu utiliza o sursă atât de intensă! Micșorează intensitatea! Undele luminoase vor fi mai slabe

și nu vor perturba electronii așa tare. Micșorând intensitatea luminii din ce în ce mai mult, până la urmă unda va fi suficient de slabă pentru ca efectul ei să devină neglijabil." Bine, să încercăm. Primul lucru pe care îl observăm este că scânteierile de lumină împrăștiate de electronii care trec *nu* devin mai slabe. *Scânteierile sunt mereu la fel de intense.* Singurul lucru care se petrece când intensitatea luminii scade e că uneori auzim un „tic" în detector, dar nu vedem *nici o scânteiere*. Electronul a trecut fără să fi fost „văzut". Observăm acum că și lumina se comportă ca electronii; *știam* că ea este „ondulatorie", dar acum constatăm că e și „corpusculară". Întotdeauna lumina sosește — sau e împrăștiată — în bucăți pe care le numim „fotoni". Când mișcorăm *intensitatea* sursei luminoase nu modificăm *mărimea* fotonilor, ci doar *numărul* de fotoni emiși în unitatea de timp. Așa se explică de ce, atunci când sursa e slabă, unii electroni trec fără să fie văzuți. S-a întâmplat ca, la momentul când trecea electronul, să nu existe nici un foton prin apropiere.

Toate acestea sunt cam descurajante. Dacă e adevărat că ori de câte ori „vedem" electronul vedem o scânteiere la fel de intensă înseamnă că toți electronii, pe care îi vedem, sunt *de fiecare* dată perturbați. Să încercăm totuși experiența cu o lumină slabă. Acum, ori de câte ori auzim un tic în detector vom ține o contabilitate pe trei coloane: în coloana (1) electronii văzuți în vecinătatea orificiului 1, în coloana (2) electronii văzuți în vecinătatea orificiului 2, iar în coloana (3) electronii oare nu au fost văzuți deloc. Când prelucrăm datele (calculăm probabilitățile) găsim rezultatele următoare: electronii „văzuți în vecinătatea orificiului 1" au o distribuție asemănătoare cu $P'_1$; cei „văzuți în vecinătatea orificiului 2" au o distribuție asemănătoare cu $P'_2$ (așa încât cei „văzuți în vecinătatea oricăruia dintre orificiile 1 sau 2" au o dis-

tribuție asemănătoare cu $P'_{12}$); iar cei „care nu au fost văzuți deloc“ au o distribuție „ondulatorie“ exact ca $P_{12}$ din figura 6.3! *Dacă electronii nu sunt urmăriți, există interferență!*

E de înțeles că se întâmplă așa. Când nu vedem electronul înseamnă că nici un foton nu-l perturbă, iar când îl vedem el a fost perturbat de un foton. Mărimea perturbației e totdeauna aceeași, deoarece toți fotonii produc efecte la fel de mari; iar efectul fotonilor împrăștiați este suficient pentru a netezi orice efect de interferență.

Există *vreun mod* în care să putem vedea electronii fără a-i perturba? Am învățat într-un capitol anterior că impulsul transportat de un „foton“ e invers proporțional cu lungimea sa de undă ($p = h/\lambda$).* Izbitura dată electronului când fotonul este împrăștiat spre ochiul nostru depinde de impulsul transportat de foton. Aha! Dacă vrem să perturbăm doar foarte puțin electronul nu trebuie să micșorăm *intensitatea* luminii, trebuie să-i micșorăm *frecvența* (adică să-i mărim lungimea de undă). Să utilizăm lumină mai roșie. Am putea utiliza chiar lumină infraroșie, sau unde radio (de exemplu radar), și să „vedem“ pe unde a mers electronul cu ajutorul unui dispozitiv care poate „vedea“ lumină de aceste lungimi de undă mari. Dacă utilizăm lumină mai „blândă“ putem eventual evita o perturbare atât de mare a electronilor.

Să încercăm experiența cu unde mai lungi. Vom repeta experiența de mai multe ori, de fiecare dată cu lumină de lungime de undă mai mare. La început nu pare să se schimbe nimic; rezultatele sunt aceleași. Apoi se petrece ceva oribil. Vă amintiți că atunci când am vorbit despre microscop am subliniat faptul că, datorită *naturii ondulatorii* a luminii, există o limitare în ceea ce privește distanța minimă dintre două

---

* *h* este constanta lui Planck. (*N. red.*)

puncte care pot fi distinse separat. Această distanță e de ordinul de mărime al lungimii de undă a luminii. Deci, dacă facem ca lungimea de undă să fie mai mare decât distanța dintre orificii, când lumina este împrăștiată de electroni vedem o scânteiere *mare* și difuză. Nu am putea spune prin ce orificiu a trecut electronul! Știm doar că el a trecut pe undeva! Și tocmai cu lumină de această culoare constatăm că, izbiturile date electronului fiind suficient de mici, $P'_{12}$ începe să arate ca $P_{12}$ — începem să obținem un efect de interferență! Numai pentru lungimi de undă mult mai mari decât distanța dintre cele două orificii (când nu mai avem nici o șansă să spunem pe unde a trecut electronul) perturbația datorită luminii devine suficient de mică pentru ca să obținem din nou curba $P_{12}$ din figura 6.3.

În experiența noastră constatăm că e imposibil să potrivim lumina astfel încât să putem spune prin care orificiu a trecut electronul și, în același timp, să nu perturbăm distribuția electronilor pe ecran. Heisenberg a sugerat faptul că noile legi ale naturii pot fi necontradictorii numai dacă există o limitare fundamentală a posibilităților noastre experimentale, necunoscută anterior. El a propus, ca principiu general, *principiul de incertitudine*, pe care, în cazul experienței noastre, îl putem enunța după cum urmează: „Este imposibil să se imagineze un aparat pentru a determina prin ce orificiu trece electronul și care, în același timp, să nu perturbe electronii suficient de mult pentru a distruge figura de interferență." Dacă un aparat este capabil să determine prin ce orificiu trece electronul, el *nu poate* fi atât de delicat încât să nu perturbe în mod esențial figura de interferență. Nimeni nu a găsit vreodată (nici măcar în teorie) un mod de a ocoli principiul de incertitudine. Trebuie deci să presupunem că el descrie o caracteristică fundamentală a naturii.

Teoria completă a mecanicii cuantice pe care o utilizăm astăzi pentru a descrie atomii și, de fapt, întreaga materie

depinde de corectitudinea principiul de incertitudine. Întrucât mecanica cuantică e o teorie încununată de atât de multe succese, încrederea noastră în principiul de incertitudine a sporit. Dar dacă se va descoperi într-o bună zi un mod de a „înfrânge“ principiul de incertitudine, mecanica cuantică va da rezultate contradictorii și va trebui înlăturată de pe poziția de teorie valabilă a naturii.

„Bine“, veți spune, „dar cum rămâne cu Propoziția A? Este ori *nu* este adevărat că electronul trece prin orificiul 1 sau prin orificiul 2?“ Singurul răspuns care se poate da este că am găsit din experiență că există un anumit mod special în care trebuie să gândim pentru a nu ajunge la contradicții. Pentru a evita să facem preziceri greșite trebuie să spunem următoarele. Dacă observăm orificiile sau, mai precis, dacă avem un aparat capabil să determine dacă electronii trec prin orificiul 1 sau prin orificiul 2, se *poate* spune prin care orificiu trec ei. *Dar*, dacă *nu* încercăm să spunem ce cale urmează electronul, dacă în experiență nu există nimic care să perturbe electronii, atunci *nu* putem spune că un electron trece sau prin orificiul 1 sau prin orificiul 2. Dacă o spunem și începem să facem deducții pornind de aici, analiza noastră va fi greșită. Acesta este firul logic pe care trebuie să ne menținem dacă vrem să reușim să descriem natura.

*
* *

Dacă mișcarea întregii materii — ca și cea a electronilor — trebuie descrisă cu ajutorul unor unde, cum rămâne cu gloanțele din prima noastră experiență? De ce în cazul lor nu am obținut o figură de interferență? Se constată că pentru gloanțe lungimile de undă sunt atât de mici încât oscilațiile din figura de interferență sunt foarte fine; atât de fine, încât nici un detector de dimensiuni finite nu poate distinge separat maximele de minime. Ceea ce vedem este numai un

fel de medie, care reprezintă tocmai curba clasică. În figura 6.5 am încercat să indicăm schematic ce se petrece cu obiectele macroscopice. Partea (a) a figurii arată distribuţia de probabilitate pe care o putem prezice pentru gloanţe, utilizând mecanica cuantică. Oscilaţiile rapide reprezintă figura de interferenţă care se obţine pentru unde de lungime de undă foarte mică. Dar fiindcă orice detector fizic acoperă mai multe oscilaţii ale curbei de probabilitate, în urma măsurătorilor se obţine curba mai netedă desenată în partea (b) a figurii.

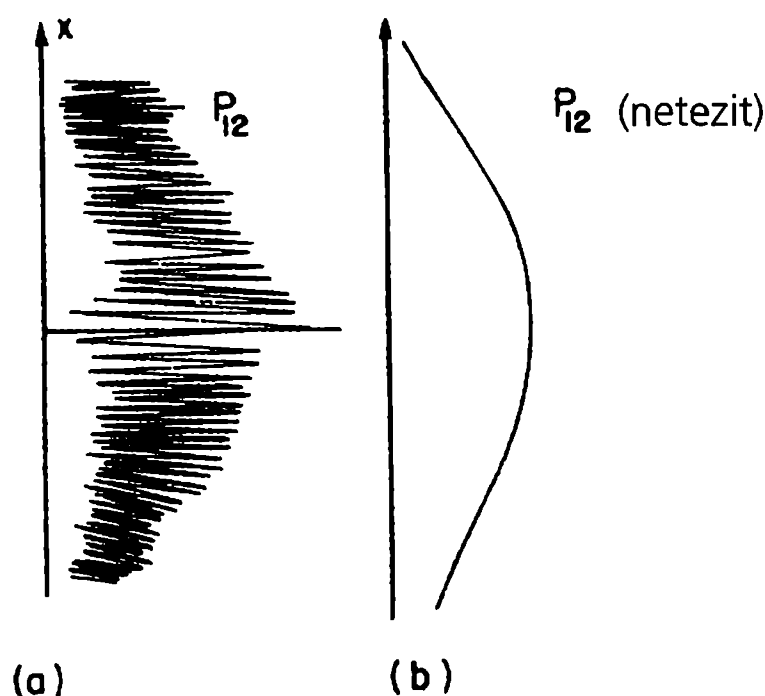



*Fig. 6.5.* Figură de interferenţă obţinută cu gloanţe: (a) reală (schematic), (b) observată

## Primele principii ale mecanicii cuantice

Vrem acum să facem un rezumat al principalelor concluzii rezultate din experimentul nostru. Vom enunţa însă rezultatele într-o formă care le face să fie adevărate pentru o clasă generală de astfel de experimente. Putem alcătui acest rezumat mai simplu dacă începem prin a da definiţia „experimentului ideal“ : un experiment în care nu apar influenţe externe incerte, de exemplu oscilaţii sau alte fenomene pe care nu le putem lua în considerare. O definiţie destul

de exactă ar fi: „Un experiment ideal este un experiment în care toate condițiile inițiale și finale sunt complet specificate.“ Ceea ce vom numi „eveniment“ este, în general, un anumit ansamblu de condiții inițiale și finale. (De exemplu: „un electron părăsește tunul, ajunge la detector și nu se petrece nimic altceva“). Iar acum, rezumatul concluziilor.

## REZUMAT

(1) Într-un experiment ideal probabilitatea unui eveniment este dată de pătratul valorii absolute a unui număr complex Φ numit amplitudine de probabilitate.

$$\begin{aligned} &P = \text{probabilitate} \\ &\Phi = \text{amplitudine de probabilitate} \\ &P = |\Phi|^2 \end{aligned} \tag{6.6}$$

(2) Când un eveniment se poate realiza în mai multe moduri alternative, amplitudinea de probabilitate pentru acest eveniment este suma amplitudinilor de probabilitate pentru fiecare mod considerat separat. Există interferență.

$$\begin{aligned} &\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 \\ &P = |\Phi_1 + \Phi_2|^2 \end{aligned} \tag{6.7}$$

(3) Dacă se efectuează un experiment capabil să determine dacă se realizează efectiv o alternativă sau alta, probabilitatea evenimentului este suma probabilităților pentru fiecare alternativă. Interferența dispare.

$$P = P_1 + P_2 \tag{6.8}$$

Ați putea întreba totuși: „De ce e așa ? Care e mecanismul din spatele acestor legi ?“ Nimeni nu a găsit vreun mecanism

în spatele lor. Nimeni nu poate „explica“ mai mult decât am „explicat“ deja. Nimeni nu vă va da vreo reprezentare mai profundă a situației. Nu avem nici un fel de idee despre existența unui mecanism mai fundamental din care să poată fi deduse aceste legi.

*Vrem să subliniem o foarte importantă diferență dintre mecanica clasică și mecanica cuantică.* Am vorbit despre probabilitatea de sosire a unui electron, în anumite condiții date. Am presupus în mod implicit că, cu dispozitivul nostru experimental (sau chiar cu cel mai bun dispozitiv posibil), va fi imposibil să prezicem exact ce se va petrece. Putem prezice numai probabilități! Dacă e adevărat, asta înseamnă că fizica a renunțat la încercarea de a prezice exact ce se va petrece în anumite condiții date. Da! *A renunțat* într-adevăr! *Nu știm cum să prezicem cu certitudine ce se va întâmpla într-o situație dată*, iar astăzi credem că acest lucru e imposibil, că singurul lucru care poate fi prezis este probabilitatea diverselor evenimente. Trebuie să recunoaștem că aceasta este o diminuare a idealului nostru anterior de înțelegere a naturii. Poate că e un pas înapoi, dar nimeni nu a descoperit vreun mod de a-l evita.

Vom face acum câteva observații asupra unei sugestii care a fost dată uneori în încercarea de a se evita descrierea de mai sus: „Poate că electronul are un fel de mecanism intern — niște variabile interne — pe care însă nu-l cunoaștem. Poate că acesta e motivul pentru care nu putem prezice ce se va petrece. Dacă am putea observa mai atent electronul, am fi în stare să spunem unde va ajunge el.“ După câte știm, așa ceva e imposibil. Dificultățile nu ar fi înlăturate. Închipuiți-vă că am presupune că înăuntrul electronului există un fel de mecanism care determină unde va ajunge el. Acest mecanism trebuie *de asemenea* să determine prin ce orificiu va trece electronul în drumul său. Dar să nu uităm că ceea ce se află în interiorul electronului nu trebuie să de-

pindă de ce facem *noi*, în particular de faptul că închidem sau deschidem unul din orificii. Deci, dacă un electron, înainte de a porni, s-a hotărât deja (a) ce orificiu va utiliza și (b) unde se va opri, trebuie să găsim $P_1$ pentru electronii care au ales orificiul 1, $P_2$ pentru cei care au ales orificiul 2 și, *în mod necesar*, suma $P_1 + P_2$ pentru cei care sosesc prin cele două orificii. Se pare că această concluzie nu poate fi ocolită. Dar am verificat experimental că nu așa stau lucrurile, iar nimeni nu a imaginat o ieșire din această încurcătură. Deci în momentul de față trebuie să ne limităm la calcularea probabilităților. Spunem „în momentul de față", dar avem o puternică bănuială că lucrurile vor rămâne așa pentru totdeauna — că e imposibil să dezlegăm acest mister —, că așa e făcută natura.

## PRINCIPIUL DE INCERTITUDINE

Iată modul în care și-a enunțat inițial Heisenberg principiul de incertitudine: Dacă se face o măsurătoare asupra oricărui obiect și se poate determina componenta $x$ a impulsului său cu o incertitudine $\Delta p$, nu se poate cunoaște simultan și poziția sa cu o precizie mai mare decât $\Delta x = h/\Delta p$. Produsul incertitudinilor asupra poziției și impulsului trebuie să fie în orice moment mai mare decât constanta lui Planck. Acesta este un caz particular al principiului de incertitudine, enunțat mai sus în cazul general. Enunțul general spunea că nu se poate construi nici un aparat pentru a se determina care din cele două alternative este aleasă, fără ca în același timp să se distrugă figura de interferență.

Să arătăm, considerând un caz particular, că relația dată de Heisenberg trebuie să fie adevărată pentru a evita contradicțiile. Ne imaginăm o modificare a experienței din figura 6.3, în care peretele cu orificii constă dintr-o placă montată

pe rotile, astfel încât să se poată mişca liber în sus şi în jos (în direcţia $x$), după cum se arată în figura 6.6. Observând atent mişcarea plăcii putem încerca să spunem prin care orificiu trece un electron. Închipuiţi-vă ce se petrece când detectorul e aşezat în punctul $x = 0$. E de aşteptat ca electronul care trece prin orificiul 1 să fie deviat de placă în jos, pentru a ajunge la detector. Cum componenta verticală a impulsului electronului se modifică, placa trebuie să sufere un recul cu un impuls egal, însă îndreptat în sens opus. Placa va avea un recul în sus. Dacă electronul trece prin orificiul inferior, placa trebuie să sufere un recul în jos. E clar că, pentru orice poziţie a detectorului, impulsul primit de placă va avea o valoare diferită la trecerea electronului prin orificiul 1 de valoarea sa la trecerea prin orificiul 2. Astfel, fără a perturba *deloc* electronii, doar observând *placa*, putem spune ce traiectorie a urmat electronul.

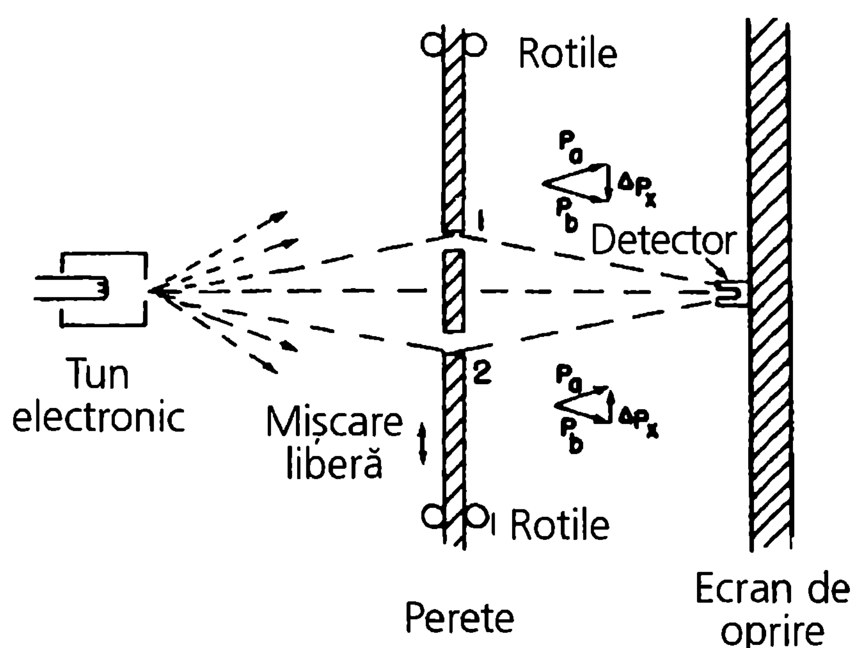



*Fig. 6.6.* Experienţă în care se măsoară reculul peretelui

Dar pentru a face aceasta e necesar să ştim care este impulsul plăcii înainte de trecerea electronului; astfel, măsurând impulsul după ce electronul a trecut, putem calcula cât de mult s-a modificat impulsul plăcii. Amintiţi-vă însă că, în conformitate cu principiul de incertitudine, nu putem cunoaşte în acelaşi timp şi poziţia plăcii cu o precizie arbitrar

de mare. Dar, dacă nu știm exact *unde* se află placa, nu putem spune cu precizie unde se află cele două orificii. Ele se vor afla în alt loc pentru fiecare electron care trece. Aceasta înseamnă că centrul figurii noastre de interferență va avea o poziție diferită pentru fiecare electron. Oscilațiile figurii de interferență vor fi netezite. Vom arăta în mod cantitativ în capitolul următor că, dacă determinăm impulsul plăcii suficient de precis pentru a determina din măsurarea reculului care orificiu a fost utilizat la trecerea electronului, incertitudinea în poziția $x$ a plăcii va fi (conform principiului de incertitudine) suficientă pentru a deplasa figura de interferență observată la detector aproximativ cu distanța dintre un maxim și cel mai apropiat minim. O asemenea deplasare e exact ce trebuie pentru a netezi distribuția și nu vom mai observa interferență.

Principiul de incertitudine „protejează" mecanica cuantică. Heisenberg a recunoscut că, dacă ar fi posibil să se măsoare simultan impulsul și poziția cu o precizie mai mare, mecanica cuantică s-ar prăbuși. El a sugerat ideea că acest lucru trebuie să fie imposibil. Apoi oamenii au încercat să imagineze diverse căi de a efectua o asemenea măsurătoare, și nimeni nu a putut inventa un mod de a se măsura poziția și impulsul vreunui obiect oarecare (ecran, electron, bilă de biliard sau orice altceva) cu o precizie mai mare. Mecanica cuantică își continuă existența ei îndrăzneață, dar exactă.

# Cuprins

Redactor
VLAD ZOGRAFI

Tehnoredactor
LUMINIȚA SIMIONESCU

Corector
GEORGIANA BECHERU

Apărut 2010
BUCUREȘTI – ROMÂNIA

Lucrare executată la PRO EDITURĂ ȘI TIPOGRAFIE

La începutul anilor '60, la Institutul Tehnologic din California a avut loc probabil cel mai spectaculos eveniment din istoria învățământului de fizică: unul din marii fizicieni ai secolului XX, laureat al Premiului Nobel în 1965, a ținut un curs introductiv de fizică pentru studenții din primii ani. Cursul avea să fie tipărit în milioane de exemplare în lumea întreagă, căpătând o notorietate fără egal și devenind pentru generațiile de elevi și studenți care s-au succedat o superbă inițiere în studiul fizicii. Fizicianul de la Caltech este Richard P. Feynman, cel ce a introdus diagramele care îi poartă numele și metoda integralei de drum, dar și un stil nonconformist, deopotrivă ludic și pătrunzător, de a face știință. De la spargerea seifurilor cu documente secrete (pe când lucra la proiectul bombei atomice, în timpul războiului) la contribuțiile sale cruciale în electrodinamica cuantică și de la cursurile ținute studenților începători la explicarea simplă a dezastrului navetei Challenger, tot ce a făcut Feynman poartă amprenta spiritului său sclipitor și surprinzător. În timp, a devenit, alături de Einstein, unul dintre cele mai puternice simboluri ale științei.

Alte cărți de știință la Humanitas:
Brian Greene
*Universul elegant*
Richard Dawkins
*Ceasornicarul orb*
*Un râu pornit din Eden*
Werner Heisenberg
*Partea și întregul*
Steven Weinberg
*Visul unei teorii finale*
Ian Stewart
*Numerele naturii*

ISBN 978-973-50-2631-8
